…wski

…JE

…OJU

…KI

…SIE

M. Grotowski

DZIEJE
ROZWOJU
FIZYKI
W ZARYSIE

BIBLJOTEKA
„MATHESIS POLSKIEJ”
CZASOPISMA MATEMATYCZNO-FIZYCZNEGO

DZIEJE ROZWOJU FIZYKI

W ZARYSACH

OPRACOWALI

Dr M. GROTOWSKI, M. SADZEWICZOWA,
Dr W. WERNER i Dr S. ZIEMECKI

Wydanie drugie, całkowicie przerobione

TOM I

WARSZAWA — 1931
NAKŁADEM REDAKCJI „MATHESIS POLSKIEJ“
SKŁAD GŁÓWNY W KSIĄŻNICY - ATLAS T. N. S. W.

DZIEJE ROZWOJU FIZYKI

W ZARYSACH

OPRACOWALI

Dr M. GROTOWSKI, M. SADZEWICZOWA,
Dr W. WERNER i Dr S. ZIEMECKI

Wydanie drugie, całkowicie przerobione

TOM I

MECHANIKA OGÓLNA, MECHANIKA NIEBA i DYNAMICZNE WŁASNOŚCI MATERJI — RUCH FALOWY i AKUSTYKA — CIEPŁO — TEORJA KINETYCZNA GAZÓW

Z 78 rysunkami w tekście i 10 portretami

WARSZAWA — 1931
NAKŁADEM REDAKCJI „MATHESIS POLSKIEJ"
SKŁAD GŁÓWNY W KSIĄŻNICY - ATLAS T. N. S. W.



Odbito czcionkami Drukarni Krajowej w Warszawie, Chłodna 44. Telef. 188 - 70.

PRZEDMOWA DO II WYDANIA.

Pierwsze wydanie tej książki spotkało się z przychylnem przyjęciem tak ze strony czytelników, jak i krytyki (recenzje profesorów Smoluchowskiego, Lorii), chętnie więc przystąpiliśmy do opracowania nowego wydania. Mniemając, że książka o charakterze wypisów daje realny pożytek stosunkowo szczupłemu gronu osób, mających gruntowne przygotowanie naukowe, zamierzyliśmy zmienić zasadniczo charakter dzieła, pisząc zarys historji fizyki, któryby zawierał w odpowiednich miejscach wyjątki z prac oryginalnych. Krótkość czasu nie pozwoliła zrealizować tego planu w całej rozciągłości.

Ostatnie dwudziestolecie stanowi niewątpliwie jedną z najważniejszych epok w rozwoju naszej nauki. W ciągu tego czasu wzrosła kolosalnie wiedza faktyczna i to nietylko dzięki wysubtelnieniu metod i narzędzi badania, lecz również — dzięki nowym płodnym ideom, które zmieniły zasadniczo światopogląd wieku XIX-go. Wydawało się niepodobieństwem poprzestać na fizyce klasycznej, pomijając milczeniem najbardziej żywotne zagadnienia, wiążące się z wartkim potokiem myśli obecnego pokolenia, — zagadnienia, posiadające olbrzymią donioslość tak z punktu widzenia poznawczego, jak i czysto praktycznego.

Należało się jednak liczyć z tem, że dziedziny nowe mało naogół są znane wśród szerszego ogółu. W tych warunkach przedstawienie rzeczy ściśle historyczne nie byłoby celowe; wypadło więc zagadnienia fizyki współczesnej traktować raczej ze stanowiska logicznego, wplatając jedynie tu i owdzie uwagi historyczne i charakterystyczne ustępy z prac oryginalnych. Mamy nadzieję, że odnośne rozdziały oddadzą usługę wszystkim osobom interesującym się postępami fizyki, — tembardziej, że polskie piśmiennictwo popularno-naukowe jest dotychczas ubogie, szczególnie w stosunku do nowych zagadnień.

Ze względu na cel i charakter książki unikaliśmy wywodów matematycznych, poza nielicznemi zupełnie elementarnemi przeróbkami. Szukaliśmy przeto stale oparcia o doświadczenie, co pozwoliło szki-

cować główne idee słowami, z pominięciem symboli rachunkowych. Tendencja taka musiała się, oczywiście, odbić na wyborze materjału naukowego.

Nadmienimy wreszcie, że i w dziedzinie fizyki klasycznej rozszerzyliśmy niektóre działy, np. akustykę; uwzględniliśmy też teorję kinetyczną gazów, pominiętą w pierwszem wydaniu. Z drugiej strony, by nie powiększać nadmiernie objętości książki, musieliśmy skrócić rozdziały, które wydawały się mniej istotnemi.

Panu St. Warhaftmanowi, redaktorowi „Mathesis Polskiej", który nie szczędził starań, by zapewnić książce jaknajlepszą szatę zewnętrzną, składamy nasze szczere podziękowanie.

Autorowie.

Warszawa, we wrześniu 1930 r.

PRZEDMOWA DO I WYDANIA

Od lat kilkunastu w nauczaniu fizyki powstał silny prąd, skierowany ku bardziej bezpośredniemu, niż dotychczas, zetknięciu się ucznia z przedmiotem nauczania. Dwie drogi w pierwszym rzędzie wiodą do tego celu: ćwiczenia własnoręczne zbliżają uczącego się do samej przyrody, — czytanie prac oryginalnych zapoznaje go z indywidualnością wielkich twórców myśli naukowej.

Obie te drogi nie mogą, rzecz prosta, zastąpić podręcznika; powinny jedynie uzupełnić wykład ściśle logiczny. Podręcznik jest niejako pośrednikiem pomiędzy czytelnikiem a uczonym. Ale najsumienniejszy, najwymowniejszy pośrednik nie zastąpi obcowania z twórczym umysłem badacza: fakty i prawdy naukowe w przedstawieniu ludzi, którym się one bezpośrednio objawiły, występują plastyczniej i łatwiej wrażają się w pamięć, niż w wykładzie systematycznym; nieraz też są jaśniejsze i zrozumialsze, niż w opracowaniach późniejszych, zwłaszcza popularnych; przyzna to zapewne każdy, kto porówna popularne opracowania zasady względności, teorji elektromagnetycznej światła, teorji elektronowej lub teorji barwy dźwięku z oryginalnemi pracami Einstein'a, Maxwell'a, J. J. Thomson'a, Helmholtz'a. Jest to zrozumiałe: któż bowiem stara się jaśniej wypowiedzieć myśl swoją, niż twórca nowego poglądu, wystawiony na krytykę ludzi, przywykłych do pojęć już

utartych? któż wszechstronniej zbadał daną sprawę doświadczalnie, lub rozważył teoretycznie? Nie przeczymy, że bywają przykłady wprost przeciwne; staraliśmy się pominąć je w tym zbiorze.

Nie należy też niedoceniać znaczenia wychowawczego historycznego poznania nauki. Kształtujący się charakter napotyka tu zdumiewające przykłady żelaznego hartu woli, pracowitości mrówczej, całkowitego podporządkowania życia wielkiej idei przewodniej. Pod tym względem jest chyba fizyka dziedziną wyjątkowo uprzywilejowaną. Dość wspomnieć imiona Galileusza, Newtona, Huygens'a, Faraday'a, Fresnel'a, których życie jest pasmem poświęceń dla nauki i idei obowiązku.

Na Zachodzie zrozumiano oddawna doniosłość uprzystępnienia źródeł naukowych. W dziedzinie nauk ścisłych największą popularność zyskało niemieckie wydawnictwo p. t. „Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften", które w stu kilkudziesięciu tomikach zawiera szereg najwybitniejszych pomników myśli ludzkiej. Podobne zbiory posiadają i inne narody; my i pod tym względem pozostaliśmy w tyle.

Wydając niniejszy zbiór prac oryginalnych najwybitniejszych fizyków, chcieliśmy zapełnić tę lukę w skromnym tylko zakresie; mając na względzie przedewszystkiem potrzeby szkolnictwa, pragnęliśmy dać książkę, która mogłaby się znaleźć w rękach ucznia klas starszych lub początkującego studenta, a nauczycielowi dostarczyłaby materjału do urozmaicenia wykładu. Sądzimy jednak, że i każdy człowiek ogólnie wykształcony, interesujący się zagadnieniami fizyki, znajdzie w tej książce ciekawy dla siebie materjał.

W wydawnictwie niniejszem nie dążyliśmy do zupełności, i nic łatwiejszego, jak wykazać w niem brak nazwisk i tytułów, zasługujących na uwzględnienie. Chodziło nam raczej o uwypuklenie momentów szczególnie ważnych dla rozwoju idei zasadniczych fizyki. Wiele kwestyj wypadło pominąć dla braku czasu i miejsca. Pewne luki i nierównomierności były też spowodowane warunkami lokalnemi, mianowicie trudnością zdobycia źródeł. O wyborze pracy decydowała czasem jej dostępność. Niekiedy, zamiast tłumaczyć z oryginału, musieliśmy się posiłkować przekładami obcemi, korzystając głównie z „Klasyków" Ostwalda.

Przytoczone w książce rozprawy nie są tłumaczone w całości — zajęłoby to zbyt wiele miejsca. Mniej zajmujące szczegóły lub zbyt trudne ustępy opuszczono zupełnie albo podano w streszczeniu. Rozprawy zaopatrzono w uwagi, objaśniające miejsca trudniejsze i in-

formujące czytelnika o obecnym stanie zagadnienia. Dodano też życiorysy autorów, przeważnie zwięzłe; kilka tylko najbardziej ciekawych i pouczających potraktowano obszerniej. Krótkie ustępy z historji fizyki łączą w całość poszczególne prace.

Zbiór nasz nie jest jednolity; obok ustępów łatwych, dostępnych nawet dla początkującego czytelnika, jak wyjątki z dzieł Guericke'go, Pascal'a, Celsjusza, Gay-Lussac'a, Franklin'a, Galvani'ego, Tomasza Young'a i in., znajdują się tu i rzeczy, których dokładne zrozumienie wymaga gruntownej znajomości fizyki. Mamy tu na myśli głównie rozprawy, dotyczące drugiej zasady termodynamiki. Okoliczność ta nie może stanowić wady zasadniczej, gdyż książkę taką, jak niniejsza, czyta się przeważnie rozdziałami. Wogóle należy zaznaczyć, że istotny pożytek może odnieść czytelnik tylko wówczas, gdy przystąpi do rozpatrzenia historycznego rozwoju danego zagadnienia już po zapoznaniu się z niem w wykładzie systematycznym.

Zagranicą w ciągu lat ostatnich pojawiło się kilka wydawnictw, do pewnego stopnia analogicznych do niniejszego[1]; w wyborze i układzie materjału nie naśladowaliśmy jednak żadnego z nich.

Możność wydania tej książki zawdzięczamy łaskawemu poparciu prof. S. Dicksteina; korzystaliśmy też z jego cennych uwag a niejednokrotnie i z jego księgozbioru. Uważamy sobie za miły obowiązek złożyć Mu należne podziękowanie.

Warszawa, w lutym 1913 r.

UWAGA. Wyrazy i krótkie zdania, wtrącane niekiedy w cytowane teksty, aby ułatwić ich zrozumienie, a również i dłuższe wstawki są wyróżnione zapomocą nawiasów prostokątnych [ ]. Streszczenia opuszczonych ustępów są drukowane drobnym drukiem.

---

[1]) Wymieniamy znane nam:

F. Dannemann. „Aus der Werkstatt grosser Forscher", Lipsk 1908; stanowi tom II „Historji nauk przyrodniczych" tegoż autora. Zawiera rozprawy z całej dziedziny nauk przyrodniczych.

Coupin. „Lectures scientifiques sur la physique". Paryż 1911.

Jouguet. Lectures de mécanique. Paryż 1902.

MECHANIKA OGÓLNA, MECHANIKA NIEBA I DYNAMICZNE WŁASNOŚCI MATERJI

OPRACOWAŁA

M. SADZEWICZOWA

RYS ROZWOJU MECHANIKI W STAROŻYTNOŚCI. — STAN MECHANIKI W WIEKACH ŚREDNICH. ROZWÓJ JEJ W EPOCE ODRODZENIA. — DYNAMICZNE WŁASNOŚCI MATERJI. — MECHANIKA NEWTONJAŃSKA. MECHANIKA ANALITYCZNA. — DOŚWIADCZENIA FIZYCZNE, DOTYCZĄCE OBROTU ZIEMI I JEJ MASY

Rozdział I.

RYS ROZWOJU MECHANIKI W STAROŻYTNOŚCI.

MECHANIKA, czyli nauka o ruchu i równowadze ciał jest, obok astronomji i matematyki, najstarszą z pomiędzy nauk. Zagadnienia jej rozwijają się i dojrzewają na przestrzeni kilku tysiącleci.

Pozostałe zabytki prakultury ludzkiej: babilońskiej, asyryjskiej, egipskiej — świadczą o tem, że już na cztery tysiące lat przed erą chrześcijańską znane były praktyczne zastosowania mechaniki. Gigantyczne budowle, zwłaszcza egipskie, których ruiny dotrwały do dni naszych, nie mogły być wzniesione bez pomocy jakichś urządzeń technicznych. Tak np. piramida Cheopsa w Egipcie, wzniesiona z olbrzymich głazów około 3730 lat przed Chr., miała za podstawę prostokąt o boku równym 233 m., zaś sięgała aż 145 m. wysokości. Rys. 1 przedstawia widok ruin świątyni w Karnaku w górnym Egipcie, która zawierała prócz innych, salę o wymiarach 102 m.×51 m., wspartą na 134 kolumnach, których wysokość dochodziła do 23 m., wyciosanych w jednolitych blokach kamiennych; największe kolumny, w liczbie dwunastu, oddzielające środek sali, miały po trzy metry średnicy.

Przypuścić należy, że do ustawiania i wznoszenia tych olbrzymich mas kamiennych używano pomocy dźwigni, a może i innych machin. Przypuszczenie to potwierdzają wizerunki różnych przyrządów, np. dźwigni dwuramiennej, na płaskorzeźbach, zdobiących ściany świątyń i grobowców.

Budowle babilońskie, również olbrzymich rozmiarów, stawiane były przeważnie nie z kamienia, lecz z palonej cegły; wznoszenie takich budowli, w których spotykają się sklepienia, wymaga znajomości praw równowagi oraz umiejętności mierzenia. Wiadomości te nie mogły więc być obce babilończykom. Świadczy o tem również treść tablic z palonej gliny, pokrytych pismem klinowem, które w ilości przeszło 100.000 niedawno zostały znalezione i częściowo już odcyfrowane.

O stanie nauki u babilończyków dowiadujemy się również od greckich historyków, np. Herodota. Tak np. jednostkę czasu zapożyczyli grecy od babilończyków. Ci ostatni, przyjmując kąt trójkąta



Rys. 1.
Ruiny świątyni w Karnaku.

równobocznego za jednostkę, dzielili pełny obwód zegara słonecznego na 6 części. Na 2000 lat przed Chr. każda z tych części została jeszcze dwukrotnie przepołowiona, dając podział doby na 24 części,

co utrzymało się do czasów dzisiejszych. Na jednostce czasu opierała się również jednostka masy, za którą przyjęto masę wody, wypływającą w jednostce czasu przez bardzo mały otworek zegara wodnego. Jednostka długości zbliżona była do metra. Zagadnieniami naukowemi zajmowali się kapłani.

Spadkobiercami kultury babilońskiej i egipskiej byli grecy. Dalszym etapem rozwoju mechaniki jest mechanika grecka. Dzieli się ona na dwa okresy:

Pierwszy okres mechaniki greckiej (600 — 300 l. przed Chrystusem). Pierwszymi fizykami w Grecji byli wielcy filozofowie greccy. Ogniskiem ich pracy były Ateny. Zastanawiając się nad początkiem i prawami bytu, napotykają oni również zagadnienia fizyczne. Fizyka ich, pobawiona pierwiastka doświadczalnego, była raczej filozofją przyrody. W dziełach niektórych filozofów greckich znajdują się zagadnienia czysto fizyczne.

ANAKSAGORAS (500 — 428) mówi, że księżyc i gwiazdy spadłyby na ziemię, gdyby nie znajdowały się w ruchu po kole. W powiedzeniu tem tkwi przeczucie siły odśrodkowej oraz siły przyciągania ziemskiego, którego działanie rozszerza Anaksagoras na księżyc i gwiazdy.

DEMOKRYT (470 — 362) rozwija i precyzuje założenia teorji atomistycznej, wprowadzone już przedtem przez Empedoklesa (490—430).

ARYSTOTELES ze Stagiry (384 — 322), założyciel szkoły perypatetyków w Atenach i nauczyciel Aleksandra Macedońskiego, pisze ośm ksiąg o fizyce (φυσῖκῇ αϰροασιζ), w których daje systematyczny przegląd stanu ówczesnej wiedzy fizycznej. Znajdujemy tam zasadę równoległoboku prędkości i zastosowanie jej do ruchu po kole, również zasadę dźwigni dwuramiennej, wypowiedzianą w słowach następujących:

„Ciężar poruszany stoi do poruszającego w stosunku odwrotnym do ich odległości od punktu środkowego i poruszanie staje się tem łatwiejszem, im dalej ciężar poruszający znajduje się od punktu środkowego".

Arystoteles zastanawiał się również nad warunkami równowagi ciał zanurzonych — nie doszedł jednak do rozwiązania tego zagadnienia.

W sprawie próżni, której możliwości nie uznawał, wypowiedział się w następujący sposób:

„Ci zaś, którzy usiłują okazać, że próżnia nie istnieje, obalają nie to, co ludzie chcą określić jako próżnię, lecz źle skierowują swoje dowody, jak Anaksagoras i wszyscy, którzy w ten sposób argumentują.

Wykazują oni bowiem li-tylko, że powietrze jest czemś, napełniając i wydymając niem puste miechy i okazując przytem, jak mocnem jest powietrze, lub też zatrzymując powietrze w zegarach wodnych. Ludzie jednak chcieliby pod próżnią rozumieć rozciągłość, w której nie znajdują się żadne, pod zmysły podpadające ciała, zaś sądząc, że każda rzecz istniejąca jest ciałem, powiadają, że próżnia jest to, w czem wogóle nic niema, nie zaś to, co jest napełnione powietrzem. Nie to więc trzeba wykazać, że powietrze jest czemś, lecz że niema rozciągłości różnej od ciał [1], lub takiej, która całe ciało rozdziela tak, że przestaje ono być ciągłem, jak twierdzi Demokryt, Leukippos i wielu innych filozofów, ani też, że nic podobnego nie istnieje nazewnątrz istniejących ciągłych całkowitych ciał".

Spór ten znalazł rozwiązanie na drodze doświadczalnej w wieku XVII, czyli w dwa tysiące lat później (p. str. 59). Również w dwa tysiące lat później zostały przez Galileusza doświadczalnie wykryte prawa swobodnego spadku ciał (p. str. 45), ale już Arystoteles zastanawiał się nad niemi i chociaż doszedł do wyników błędnych, że ciała cięższe spadają szybciej, jednak już samo postawienie zagadnienia, które parę tysięcy lat czekać musiało na rozwiązanie, świadczy o potędze i wysokiej kulturze umysłowej greckich filozofów.

Drugi okres mechaniki greckiej zaczyna się po upadku samodzielności Grecji, gdy centrum kultury starożytnej przenosi się z Aten do Aleksandrji w Egipcie. Członkowie dynastji Ptolomeuszów, dbając o rozwój nauki, zakładają w Aleksandrji muzeum i bibljotekę, liczącą przeszło 700.000 dzieł, oraz usiłują skupić na dworze swym ówczesnych uczonych i filozofów. Przebywają tu również uczeni greccy, jak: znany matematyk Euklides (ok. 300 l. przed Chr.), Arystarch z Samosu (ok. 280 l. prze. Chr.), twórca systemu heliocentrycznego, astronom Hipparch (160 l. prz. Chr.), Ktesibjusz, Witruwjusz, autor dzieła „De architectura". Do tego okresu należy również Klaudjusz Ptolomeusz, twórca Almagestu (p. str. 29), oraz Archimedes, który chociaż nie przebywał stale w Aleksandrji, wiadomem jest jednak, że podróżował do Egiptu.

Okres ten jest okresem rozwoju przedewszystkiem matematyki i astronomji. To też i fizyka w tym okresie nosi charakter fizyki matematycznej, chociaż twórcy jej zajmowali się również zagadnieniami praktycznemi. Głównymi przedstawicielami fizyki w tym okresie są Archimedes z Syrakuz i Heron z Aleksandrji.

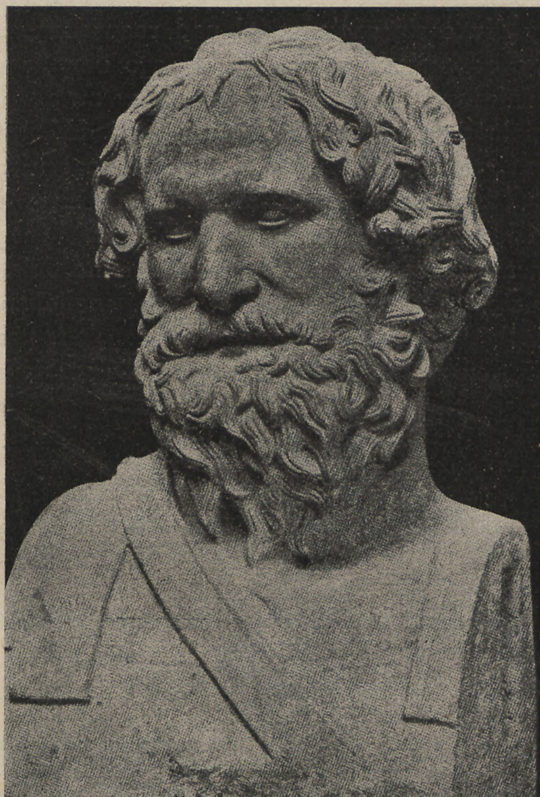
---

[1] (Porówn. Descartes'a na str. 39).

ARCHIMEDES.

(287—212 przed Chr.).

Archimedes urodził się w Syrakuzach i był krewnym i przyjacielem króla Hierona. Życie jego jest mało znane, było ono opisane przez Heraklidesa, ale opis ten, niestety, zaginął. To, co doszło do



Rys. 2.

Archimedes.

nas, zawdzięczamy Polibiuszowi, Cyceronowi, Tytusowi Liwiuszowi, Plutarchowi i niektórym innym autorom starożytnym. Charakteryzują oni Archimedesa jako genialnego uczonego, całkowicie oddanego swym rozmyślaniom; musiano mu przypominać o jedzeniu, piciu i chodzeniu do łaźni, gdzie nie przestawał kreślić figur geometrycznych nawet na własnem, namaszczonem olejami ciele. Charakterysty-

ce tej odpowiada również znane opowiadanie Witruwjusza w dziele „De architectura", dotyczące genezy słynnej zasady Archimedesa. Król Hieron, chcąc ofiarować koronę do świątyni, kazał wykonać ją złotnikowi, przeznaczając na ten cel odważoną ilość złota. Złotnik zwrócił koronę odpowiedniej wagi, lecz istniało podejrzenie, iż część złota zachował dla siebie, zastępując ją przez odpowiednią wagę srebra. Król rozstrzygnięcie tej sprawy powierzył Archimedesowi. Uczony długo się zastanawiał nad rozwiązaniem zadania, aż niespodziewanie odpowiedź zajaśniała w jego umyśle w chwili, gdy siedział w wannie; było to prawdopodobnie w związku z odczuciem na własnem ciele działania praw hydrostatyki. Uderzony tą myślą, Archimedes wyskoczył z wanny i biegł nagi ulicami Syrakuz, obwieszczając zdumionym współziomkom radosną wieść „εὕρηκα!" (heureka, znalazłem): ciało zanurzone w wodzie traci (pozornie) na ciężarze tyle, ile waży ciecz przez nie wyparta. Korona, dzieło złotnika, zanurzona w wodzie, traci na wadze więcej, niż równa jej co do wagi ilość złota i mniej niż ilość srebra tej samej wagi. Odkrycie to pozwoliło nietylko wykryć nadużycie złotnika, ale dokładnie obliczyć domieszkę srebra[1]).

[1]) Oznaczmy przez:

q ciężar złota, przeznaczonego na koronę,
q' ciężar tej samej masy złota w wodzie,

wtedy, według zasady Archimedesa, gęstość złota d wyrazi się wzorem

$$d = \frac{q}{q - q'},$$

Ten sam ciężar q srebra ważył w wodzie q_1', a więc gęstość d_1 srebra wyrazi się wzorem

$$d_1 = \frac{q}{q - q_1'},$$

Jeśli złotnik zastąpił część złota q_x przez srebro tej samej wagi, to średnią gęstość d'' korony oznaczyć można, zważywszy ją w wodzie. Jeśli ciężar jej w wodzie wynosi q'', — to na podstawie zasady Archimedesa

$$d'' = \frac{q}{q - q''}$$

Ponieważ przez q_x oznaczyliśmy domieszkę srebra, którą należy określić, przeto

$q - q_x$ oznacza wagę złota w koronie.

Objętość wyraża się ilorazem ciężaru przez gęstość, przeto

$$\frac{q - q_x}{d} + \frac{q_x}{d_1} = \frac{q}{d''}.$$

Z równania tego wyznaczamy niewiadomą q_x (domieszkę srebra)

$$q_x = \frac{d_1 d'' - d d_1}{d_1 d'' - d d''} q$$

Znanem jest również wyrażenie Archimedesa, dotyczące dźwigni. Miał on powiedzieć Hieronowi: „Daj mi punkt oparcia, a sam jeden poruszę z posad ziemię", i dla wykazania możności przezwyciężenia dużego oporu przy pomocy małej siły, sam jeden w oczach zdumionego króla poruszył w porcie przy pomocy odpowiednich kombinacyj dźwigni i bloków ciężki, okuty ołowiem statek.

Po śmierci Hierona i po strąceniu z tronu wnuka jego Hieronima, gdy Syrakuzy, zawarłszy przymierze z Kartaginą, naraziły się przez to na wojnę z Rzymem, Marcellus, wódz rzymski, oblegał Syrakuzy. Wówczas wynalazki Archimedesa miały długo bronić ojczyzny jego od zguby. Maszyny jego miotały grad pocisków na wojska nieprzyjacielskie, ogromne haki żelazne, zawieszone na łańcuchach, chwytały i przewracały statki nieprzyjacielskie. Doszła do nas nawet nieprawdopodobna wersja, że promienie słoneczne, skupione przy pomocy zwierciadeł wklęsłych, jego wynalazku, zapalały z odległości flotę nieprzyjacielską. Ostatecznie Rzymianie podstępem zdobyli Syrakuzy i jednym z pierwszych, padł sędziwy Archimedes, do tego stopnia zajęty kreśleniem figur geometrycznych na piasku, że do żołnierza rzymskiego, zadającego mu cios śmiertelny, zawołał tylko: „Nolli tangere circulos meos!" (Nie ruszaj moich kół!). Marcellus był bardzo zmartwiony śmiercią sędziwego uczonego, wyprawił mu pogrzeb i na grobie jego kazał, zgodnie z życzeniem Archimedesa, postawić walec z wpisaną weń kulą i wyrytym wewnątrz napisem, dotyczącym stosunku tych dwu ciał.

W opowiadaniach, dotyczących życia Archimedesa, trudno odróżnić, co jest prawdą, a co podaniem, wysnutem z fantazji współczesnych i późniejszych dziejopisów na tle osobistości genjalnego matematyka.

Archimedesa zajmowały przedewszystkiem zagadnienia geometryczne. Pierwszy obliczył miarę stosunku okręgu koła do średnicy (liczbę π), formułując ją w słowach następujących:

„Okręg koła równy jest trzykroć razy średnicy, więcej ułamek średnicy, który jest mniejszy, niż siódma jej część i większy, niż dziesięć razy siedmdziesiąta pierwsza". $\left(\frac{1}{7} > x > \frac{10}{71}\right)$.

Wogóle w jego dziełach matematycznych znajdujemy rozwiązania oryginalne, przed nim nie spotykane, wielu zagadnień geometrycznych.

Pod tym względem różni się on od Euklidesa, który genjalnie usy-

stematyzował istniejące już materjały. Z dzieł geometrycznych Archimedesa najbardziej znane są „O kuli i walcu", „O mierzeniu okręgu koła", „O konoidach i sferoidach", „O kwadraturze paraboli", „O linjach śrubowych", oraz „Rozprawa o metodzie", odnaleziona w r. 1899 w rękopisie z X wieku. Rozprawa ta, zachowana w rękopisie tym niemal w całości, zawiera wykład metody granic i zastosowanie jej do wykrywania pewnych stosunków geometrycznych, stanowiących treść odpowiednich twierdzeń. Dla wykrytych tą metodą twierdzeń, szukał następnie Archimedes ścisłych dowodów geometrycznych.

„Metoda" Archimedesa jest właściwie metodą całkowania, która dopiero w dziewiętnaście wieków po śmierci Archimedesa opracowana została, niezależnie od niego, przez Newton'a i Leibnitz'a. Metody swej używa Archimedes, między innemi, do obliczania momentu siły względem prostej i płaszczyzny. Z pomiędzy innych prac jego znaną jest rozprawa, dotycząca obliczenia ilości ziaren piasku, zawartych w objętości gwiazd stałych. W rozprawie tej Archimedes porusza zagadnienie układu świata, trzymając się systemu Arystarcha, podobnego do kopernikańskiego. W obliczeniach swych posługuje się dwoma postępami: arytmetycznym i geometrycznym, których porównanie doprowadziło w przyszłości do wykrycia logarytmów.

Dla fizyki z pomiędzy dzieł Archimedesa najważniejszemi są dwie rozprawy, z których urywki podajemy poniżej; jedna z nich „O równowadze płaszczyzn"[1], dotyczy zasady dźwigni, druga zaś „O ciałach unoszących się na płynie" dąży do teoretycznego uzasadnienia prawa hydrostatyki, znanego pod nazwą zasady Archimedesa[2].

Prócz tego Archimedesowi przypisywano 40 maszyn i przyrządów, jak zwierciadła wklęsłe, śruba wodna, śruba bez końca, wielokrążek (polispast), planetarjusz i t. d. W dziełach swych nie wspomina jednak Archimedes o swych maszynach, uważając widocznie swe wynalazki praktyczne za rzecz podrzędną w stosunku do swych wywodów teoretycznych. Wogóle w pracach swych Archimedes nie podaje genezy swoich wynalazków, lecz rozwija zagadnienia teoretyczne, traktując dane fizyczne jako hipotezy.

Archimedesa uważać można za założyciela fizyki teoretycznej.

---

[1]) „ἐπιπέδων ἰσορροπίαι".

[2]) Doszła ona do nas w przekładzie łacińskim p. t. „De iis, quae vehuntur in aqua".

O równowadze płaszczyzn czyli o ich środkach ciężkości [1]).

KSIĘGA I.

Postulaty.

1. Ciężary równe, zawieszone w odległościach równych, są w równowadze.
2. Ciężary równe, zawieszone w odległościach nierównych, nie są w równowadze, i ciężar, zawieszony w odległości większej, opuszcza się na dół.
3. Jeśli ciężary zawieszone w pewnych odległościach są w równowadze i jeśli dodamy coś do jednego z tych ciężarów, to one nie będą już w równowadze, i ten, do którego dodaliśmy coś, opuści się na dół.
4. Również, jeśli odejmiemy coś od jednego z tych ciężarów, to nie będą już one w równowadze i ten, od którego nic nie odjęliśmy, opuści się na dół.
5. Jeśli dwie figury płaskie podobne [2]) nałożone są dokładnie jedna na drugą, to ich środki ciężkości będą leżały jeden na drugim.
6. Środki ciężkości figur nierównych i podobnych są położone podobnie.

Mówimy, że punkty są położone podobnie w figurach podobnych, jeśli proste, poprowadzone do tych punktów ku kątom równym, tworzą kąty równe z bokami homologicznymi.

7. Jeśli wielkości, zawieszone w pewnych odległościach, są w równowadze, wielkości równe pierwszym, zawieszone w tych samych odległościach, będą również w równowadze.
8. Środek ciężkości figury o konturze wypukłym w jedną stronę będzie leżał z konieczności wewnątrz figury.

Postulaty powyższe przyjmuje A r c h i m e d e s i na ich podstawie dowodzi następujących twierdzeń:

TWIERDZENIE I. Jeśli ciężary zawieszone w odległościach równych są w równowadze, to ciężary te są sobie równe.

Gdyż, jeśliby one były nierówne i jeśliby od większego odjęto jego nadmiar, to ciężary pozostałe nie byłyby w równowadze, ponieważ odjęlibyśmy coś od jednego z ciężarów, które były w równowadze

---

[1]) Łaciński tytuł tej rozprawy, która zawiera sformułowanie i dowód zasady dźwigni, brzmi „De Planorum aequilibriis". Niniejszy przekład dokonany został z dzieła: Oeuvres d'Archimèdes traduites littéralement par F. Peyrard, Paris 1807"

[2]) czyli przystające.

(Postulat 3). A więc, jeśli ciężary zawieszone w odległościach równych są w równowadze, to ciężary te są sobie równe.

TWIERDZENIE II. Ciężary nierówne, zawieszone w odległościach równych, nie są w równowadze, i ciężar większy opuszcza się na dół.

Gdyż jeśli odejmiemy nadmiar, ciężary te będą w równowadze, bowiem ciężary równe znajdujące się w odległościach równych są w równowadze (Post. 1). A więc jeśli następnie dodamy to, co zostało odjęte, większy z obu ciężarów opuści się na dół, gdyż dodaliśmy coś do jednego z ciężarów, które były w równowadze (Post. 3).

TWIERDZENIE III. Ciężary nierówne, zawieszone w odległościach nierównych, mogą znajdować się w równowadze, i wtedy większy z nich będzie zawieszony w odległości mniejszej.

Niech A, B (rys. 3) będą ciężary nierówne i niech A będzie większy. Niech te ciężary, zawieszone w odległościach nierównych AG, GB będą w równowadze. Trzeba udowodnić, że długość AG jest mniejsza, niż długość GB. Przypuśćmy, że długość AG nie jest mniejsza. Odejmijmy nadmiar, jaki A posiada w stosunku do B. Ponieważ odjęliśmy coś od jednego z ciężarów, które znajdują się w równowadze, ciężar B opuści się na dół (Post. 4). Lecz ciężar ten nie opuści się na dół, gdyż, jeśli GA jest równem GB, równowaga będzie zachodzić (Post. 1), jeśli zaś GA jest większe od GB, to przeciwnie ciężar A opuści się na dół; ponieważ ciężary równe, zawieszone w odległościach nierównych, nie pozostają w równowadze, i ciężar zawieszony w odległości większej opuszcza się na dół (Post. 2). A więc GA jest mniejsze, niż GB. Jeśli więc ciężary zawieszone w odległościach nierównych są w równowadze, oczywistem jest, że ciężary te są nierówne i że większy będzie zawieszony w odległości mniejszej.

Rozumując dalej w ten sposób, dochodzi Archimedes do znanych praw dźwigni, które formułuje w sposób następujący:

Wielkości współmierne są w równowadze, jeśli są one odwrotnie proporcjonalne do odległości, w których są zawieszone. Wielkości niewspółmierne są w równowadze, kiedy wielkości te są odwrotnie proporcjonalne do odległości, w których są zawieszone.

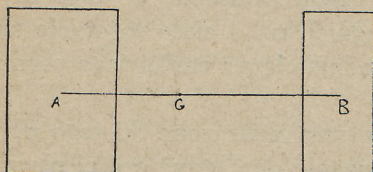
O ciałach, które unoszą się na płynie [1]).

KSIĘGA I.

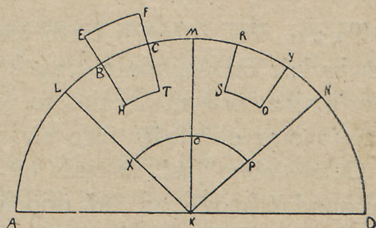
Hipoteza pierwsza. Przypuszczamy, iż płyn posiada taką własność, że części jego są rozmieszczone równomiernie i są pomiędzy sobą ciągłe; ta część, która jest mniej ściśnięta, jest wypychana przez tę, która jest bardziej ściśnięta. Każda część płynu jest ściskana w kierunku pionowym przez część znajdującą się ponad nią, zarówno w tym wypadku, kiedy płyn gdzieś spływa, jako też, kiedy jest wypychany z jednego miejsca na drugie.

Teza I. Jeśli powierzchnia, przecinana przez płaszczyznę, przechodzącą stale przez ten sam punkt, daje w przecięciu okręg koła, którego środkiem jest punkt, przez który przechodzi płaszczyzna przecinająca, to powierzchnia taka jest powierzchnią sferyczną...

Dowodzenie tej tezy jak i następnych II, III, IV-ej opuszczamy.



Rys. 3.



Rys. 4.

Teza II. Powierzchnia każdego płynu, znajdującego się w spoczynku, jest sferyczna i środek tej powierzchni sferycznej jest ten sam, co i środek ziemi.

Teza III. Jeśli ciało przy równej objętości ma ten sam ciężar, co płyn, do którego jest wpuszczone, zanurzać się ono w nim będzie aż do chwili, gdy żadna część jego nie pozostanie ponad powierzchnią płynu, lecz nie opuści się jeszcze niżej.

Teza IV. Jeśli ciało, lżejsze od płynu, pozostawione jest w płynie, to część tego ciała zostanie ponad powierzchnią płynu.

Teza V. Jeśli ciało, lżejsze od płynu, pozostawione jest w tym płynie, zanurzać się ono w nim będzie, dopóki objętość płynu, równa

---

[1]) Przekład dokonany został z dzieła „Oeuvres d'Archimèdes traduites littéralement par F. Peyrard, Paris 1807".

objętości tej części ciała, która jest zanurzona, nie będzie miała tego samego ciężaru, co całe ciało.

Przypuśćmy, że płyn jest w spoczynku, i że ciało *EHTF* (rys. 4) jest lżejsze od płynu. Jeżeli płyn jest w spoczynku, to części jego, które są jednakowo położone (t. j. które są położone w tym samym poziomie), znajdują się pod jednakowem ciśnieniem. Płyn więc, znajdujący się pomiędzy powierzchniami *XO*, *OP*, znajduje się pod ciśnieniem jednakowych ciężarów. Lecz ciężar płynu znajdującego się w pierwszym ostrosłupie jest, za wyjątkiem ciała *BHTC*, równy ciężarowi płynu znajdującego się w drugim ostrosłupie, za wyjątkiem płynu *RS QY*. Skąd wynika, iż objętość płynu, równa zanurzonej części ciała, ma ten sam ciężar, co całe ciało.

T e z a VI. Jeśli ciało lżejsze od płynu zanurzymy w tym płynie, ciało to wynurzy się z tem większą siłą, im większy będzie ciężar równej objętości płynu w stosunku do ciężaru tego ciała.

Dowód tej tezy opuszczamy.

T e z a VII. Jeżeli ciało cięższe od płynu wpuścimy do tego płynu, będzie ono opadało, dopóki nie osiągnie dna, i ciało to stanie się tem lżejsze w tym płynie, im większy będzie ciężar części tego płynu, wziętego w objętości tego ciała.

Oczywistem jest, iż ciało cięższe od płynu, puszczone do tego płynu opadać będzie na dół, dopóki nie dosięgnie dna; gdyż części płynu, które są pod niem, są bardziej ściśnięte, niż części bezpośrednio do nich przyległe, przypuściliśmy bowiem, iż ciało jest cięższe od płynu.

Tego, iż ciało staje się lżejsze, dowodzi się sposobem następującym: Przypuśćmy, że ciało stałe *A* jest cięższe od płynu; niech *BC* [raczej $B+C$] oznacza ciężar ciała *A* i niech *B* oznacza ciężar części płynu, która ma objętość równą objętości *A*. Trzeba udowodnić, iż ciało *A*, zanurzone w płynie, ma ciężar równy *C*. Weźmy jakieś inne ciało *D*, lżejsze od płynu, którego ciężar niech się równa *B*, niech *BC* [raczej $B+C$] będzie ciężarem części płynu, mającego objętość ciała *D*. Połączone ciała *A* i *D* będą miały ten sam ciężar, co i płyn, gdyż ciężar sumy tych dwóch ciał równy jest sumie ciężarów *BC* i *B*. Lecz ciężar części płynu, mającej objętość równą sumie tych dwóch ciał, równy jest sumie ciężarów; ciała te więc, puszczone i zanurzone w płynie, będą miały ten sam ciężar, co i płyn, nie będą więc pchane ani ku górze, ani ku dołowi, gdyż ciało *A*, które jest cięższe, niż płyn, pchane będzie ku dołowi i wypychane z tą samą siłą ku górze przez ciało *D*. Lecz ciało *D*, lżejsze od płynu, wypychane będzie ku górze

z siłą równą ciężarowi C; wykazaliśmy bowiem, iż ciało lżejsze od płynu wypychane jest ku górze z siłą tem większą, im większym jest ciężar tej samej objętości płynu w stosunku do ciężaru ciała. Lecz część płynu tej samej objętości co *D* jest cięższa od *D* o ciężar *C*; oczywistem więc jest, iż ciało *A* pchane jest ku dołowi ciężarem równym *C*, czego też należało dowieść.

HERON Z ALEKSANDRJI.

(ok. 150 r. przed Chr.).

Heron żył około 150 r. prz. Chr. w Aleksandrji, gdzie nauczał w szkole, odpowiadającej naszej politechnice; składała się ona z kursu teoretycznego, po ukończeniu którego uczniowie przechodzili na praktyczny. Dzieła Herona zarówno w dziedzinie matematyki, jak mechaniki i pneumatyki były prawdopodobnie podręcznikami dla jego uczniów. We wstępie do swej pneumatyki (πνευματικα) pisze on „uważam za konieczne wyłożyć to, co doszło do nas o tym przedmiocie i dodać to, cośmy znaleźli sami. Będzie to z korzyścią dla tych wszystkich, którzy chcieliby zająć się studjowaniem matematyki i prócz tego może to przynieść wielką korzyść w praktyce i być również przedmiotem wielkiego podziwu". Zgodnie z treścią tych słów Heron umiał w zadziwiający sposób łączyć teorję z praktyką. Tak np. wyprowadził on teoretycznie wzór na obliczenie pola trójkąta na podstawie jego boków ($S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}$, i podał go w swojem dziele o miernictwie; pomiary gruntów miały ogromne znaczenie w Egipcie, do czasów zaś Herona były przeprowadzane w sposób wadliwy, z powodu braku ścisłej metody pomiarów tego rodzaju. Dzieła matematyczne Herona, niestety, zaginęły. W dziele swojem „πνευματικα" zajmuje się własnościami powietrza i pary oraz ich praktycznem zastosowaniem. Rysunki licznych przyrządów, wynalazku Herona, niedoszły do nas, niestety, w oryginale. Podane dalej rysunki są odtworzone na podstawie tekstu przez wydawcę jego dzieł. Budował on bardzo pomysłowe zegary wodne, różne rodzaje lewarów, pompki wodne, kulkę poruszaną strumieniem pary, — pierwowzór turbiny parowej i inne. Herona uważać można za twórcę nauki o gazach.

Pneumatyka [1]).

Przed przystąpieniem do tego, co mam zamiar tu wyłożyć, muszę zastanowić się nad próżnią. Jedni twierdzą, że próżni wogóle niema, inni zaś przypuszczają, że próżnia nie może tworzyć całkowitych przestrzeni, lecz może znajdować się pomiędzy cząsteczkami powietrza, wody, ognia i innych ciał. To ostatnie zdanie wydaje mi się słusznem i na pierwszy rzut oka i po rozważaniach. W rzeczy samej, naczynie np., które wielu może zdawać się pustem, w rzeczywistości nie jest puste, lecz napełnione powietrzem. Powietrze zaś, według zdania ludzi, studjujących przyrodę, składa się z lekkich ciałek. Jeżeli nalejemy wody do naczynia, które wydaje się być próżnem, to w miarę wchodzenia wody, wypływa zeń powietrze. Jeśli puste naczynie zanurzymy prostopadle dnem do góry w wodę, to woda nie wejdzie do naczynia. Wynika stąd, że powietrze jest ciałem, które zajmuje całe wnętrze naczynia i nie wpuszcza doń powietrza. Dopiero gdy przebijemy dno naczynia, woda wchodzi doń, zaś powietrze wychodzi przez otwór. Jeśli naczynie wyjmiemy z wody przed przebiciem dna, zauważymy, że ścianki wewnętrzne nie są zwilżone wodą. To również dowodzi, że powietrze jest ciałem...

Cząsteczki powietrza stykają się nawzajem, nie są jednak ściśle ze sobą złączone; pomiędzy niemi znajdują się przestrzenie próżne, podobnie jak powietrze pomiędzy ziarenkami piasku na morskiem wybrzeżu. Można wyobrazić sobie, że ziarenka piasku odpowiadają cząsteczkom powietrza, zaś powietrze znajdujące się pomiędzy ziarenkami piasku odpowiada pustym przestrzeniom pomiędzy cząsteczkami powietrza. Wskutek tego powietrze może być przez ciśnienie zduszone; gdy jednak ciśnienie ustaje, cząsteczki powracają do normalnego położenia, wskutek właściwej ciałom sprężystości. Zachowuje się więc ono podobnie do gąbki, którą możemy ściskać, lecz która po ustaniu ciśnienia zajmuje znowu pierwotną objętość. Może również powstać próżnia czasowa; gdy bowiem z naczynia o wąskiej rurce wyssiemy ustami powietrze, naczynie zawisa przyczepione do warg.

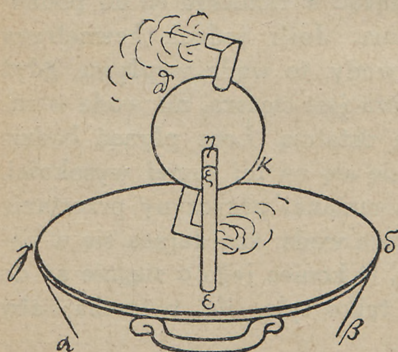
Dalej, znajdujemy w „pneumatyce" opis różnych przyrządów, pomysłu Herona. (Rys. 5 i 6).

---

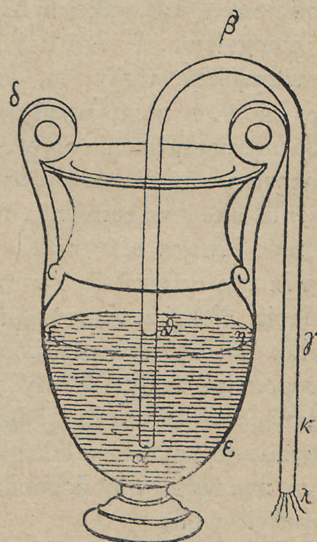
[1]) Lacour i Appel „Istoriczeskaja fizika". Gerland u. Traumüller „Geschichte der physikalischen Experimentierkunst".

Kula eolska [1]).

Nad ogrzewanym kotłem ma się na ostrzu poruszać kula. Niech będzie αβ (rys. 5) kocioł napełniony wodą i ogrzewany. Otwór jego przykryty jest pokrywą γδ; przez nią przechodzi zgięta rurka εζη, której koniec wchodzi szczelnie do pustej kuli ϑι. Naprzeciw końca η znajduje się przymocowane do pokrywy ostrze λμ. Kula opatrzona jest



Rys. 5.
Kula eolska.



Rys. 6.
Lewar.

w dwie rurki, znajdujące się po jej bokach przeciwległych, które zagięte są w strony przeciwne. Przy ogrzewaniu kotła para dostaje się do kuli przez rurkę εζη i wprawia ją w obrót z chwilą, gdy zacznie wypływać przez koniec rurek.

Bania Herona.

Przez pokrywę naczynia przeprowadzona jest przylutowana do niej rurka, która sięga prawie dna i zakończona jest wąskim otworem. Rurkę zatykamy palcem i nalewamy przez boczny otwór wody do naczynia. Następnie dmuchamy w ten otwór i zamykamy go korkiem. Jeśli odetkamy górny otwór rurki pionowej, to woda zostanie wypchniętą tą rurką przez wdmuchnięte ściśnięte powietrze.

[1]) Przekład dokonany z książki Dannemanna „Aus der Werkstätt grosser Forscher".

Lewar.

Mamy zgięty lewar αβγ, t. j. rurkę (rys. 6), której ramię αβ zanurzone jest w naczyniu δ, napełnionem wodą. Poziom wody leży na wysokości linji ζη. Ramię αβ zgiętego lewara jest do linji ζη napełnione wodą, podczas gdy cześć ϑβγ pełna jest powietrza. Jeśli teraz przez koniec λ wyssiemy wspomniane powietrze ustami, to ciecz się podniesie, gdyż, jak już było wspomniane, przestrzeń próżna jest niedopomyślenia. I jeśli koniec lewara jest na tym samym poziomie co powierzchnia wody γζη, to lewar pozostanie napełniony wodą, która nie będzie z niego wypływać. Tak więc lewar αβγ napełnił się wodą, chociaż podnoszenie się wody jest nienaturalne. Woda w tym wypadku pozostanie w równowadze jak waga, dążąc w ramieniu δβ do podnoszenia się i w ramieniu βγ do opadania. Jeśli jednak zewnętrzny koniec lewara leży niżej, niż poziom wody, to woda wypływa, gdyż woda znajdująca się w ramieniu γβ, która jest cięższa, niż woda w ramieniu βδ, przeważy i przeciągnie tę ostatnią. Lecz płynąć będzie tylko do czasu, kiedy koneic γ znajdzie się na tej samej wysokości, co poziom wody. Wtedy z wyżej wspomnianej przyczyny przestanie płynąć... Jeśli ma być odprowadzona cała woda, znajdująca się w naczyniu, to spuścimy tak głęboko lewar, iż koniec jego α sięgnie aż do dna naczynia, nie dochodząc do dna tylko tyle, ile potrzeba, aby wpuścić wodę.

Z dzieł Herona, prócz pneumatyki, doszły do nas w rękopisie arabskim jego trzy księgi mechaniki „O podnoszeniu ciężarów", w których powołuje się na nieznane nam dzieło Archimedesa „O podporach". W księgach tych znajdujemy opis machin prostych, zasadę równoległoboku prędkości oraz pojęcie o zasadzie zachowania pracy, wyrażone w sposób następujący: „zużywamy tem więcej czasu, im mniejsza jest siła poruszająca w stosunku do poruszanego ciężaru".

O podnoszeniu ciężarów [1]).

„Maszyny proste, służące do wprawiania w ruch pewnego ciężaru przy użyciu pewnej siły są w liczbie pięcu; należy wskazać ich postacie, sposoby użycia i nazwy. Maszyny te opierają się na jedynej zasadzie naturalnej, jakkolwiek napozór są nader różne. Oto ich nazwy: kołowrót, drąg, krążek, klin i śruba bez końca".

---

[1]) Feliks Kucharzewski: „Mechanika".

O śrubie wyraża się w sposób następujący, porównując ją do klina, nawiniętego na walcu:

„Obracamy ten klin zamiast go wbijać, a ciężar podnoszony wydaje się lżejszym. Lecz ułatwiając podnoszenie ciężaru, śruba działa nie tak, jak klin; klin bowiem działa wewnątrz ciała i rozszczepia to ciało, nie ruszając go z miejsca, podczas gdy śruba, będąca okręconym na walcu klinem, sama pozostaje w miejscu, a ciężar do siebie przyciąga".

———————

Rozdział II.

STAN MECHANIKI W WIEKACH ŚREDNICH. ROZWÓJ JEJ W EPOCE ODRODZENIA.

ZARÓWNO atmosfera państwa rzymskiego, zajętego rozszerzaniem granic, jak i pierwsze czasy chrześćjaństwa, które energję umysłową ludzkości w innym zwróciło kierunku, nie były pomyślne dla rozwoju nauk fizycznych. Upadek ich ostateczny nastąpił po upadku Rzymu, gdy w czasie zniszczenia, związanego z wędrówką narodów, zaginęło mnóstwo zabytków kultury starożytnej i Europa pogrążyła się w nowej fali barbarzyństwa.

Nauki i filozofja znajdują czasowy przytułek u Arabów. Komentują oni dzieła Arystotelesa, zajmują się magją, astrologją i alchemją; przyczyniają się również do pewnych postępów w astronomji, matematyce (algebra jest pochodzenia arabskiego), oraz optyce. Z dziedziny mechaniki ukazała się w r. 1137 „Księga o wagach mądrości", której autor Al Khâzinî podaje ciężary właściwe kilkudziesięciu ciał, obliczone z wielką dokładnością przy pomocy wagi hydrostatycznej. Zasługa Arabów polega głównie na przechowaniu zabytków kultury starożytnej. Z Arabji nauka klasyczna przeważnie w przekładach łacińskim i arabskim przeniesioną zostaje do Europy, gdzie w w. XIII powstają uniwersytety w Bolonji, Padwie, Paryżu, Wiedniu, Oksfordzie, Cambridge. W r. 1347 powstaje uniwersytet w Pradze Czeskiej, zaś w r. 1364 Kazimierz Wielki zakłada Szkołę Główną w Krakowie, która w r. 1400 przekształcona zostaje na Akademję. W uniwersytetach tych nauka filozofji opiera się głównie na komentowaniu pism Arystotelesa, znanych przeważnie w przekładach; pisma te, budząc zainteresowanie do nauk przyrodniczych, przenoszą jednak do nich metodę spekulatywną i djalektyczną, niezwiązaną z doświadczeniem, metodę tak zwaną scholastyczną, która panuje w fizyce aż do wieku XV. W wieku XV po upadku Konstantynopola

rozpowszechnia się znajomość języka greckiego, wraz z nią następuje bezpośrednie zetknięcie się współczesnych ośrodków naukowych z dziełami greckich filozofów, dając początek epoce humanizmu.

W dziedzinie fizyki utrzymują się oba kierunki, zapoczątkowane w starożytności: filozoficzny, wzorujący się na dziełach Arystotelesa, oraz matematyczny, nawiązujący do prac Archimedesa. Żywe zainteresowanie budzą zagadnienia, dotyczące mechaniki nieba. Tu panuje wszechwładnie system geocentryczny Ptolomeusza.

W wieku XVI i XVII zaczyna powoli w dziedzinie fizyki wytwarzać się nowa metoda, oparta na obserwacji i doświadczeniu, której nauka ta zawdzięcza swoje odrodzenie. Przewrotu na polu nauk fizycznych dokonały prace kilku genjalnych ludzi, którzy założyli podwaliny pod gmach fizyki nowoczesnej. Prace ich dotyczą głównie mechaniki i mechaniki nieba. Jednak niemal żadne wielkie odkrycie naukowe nie wybucha w istocie swej nagle, lecz dojrzewa powoli, przygotowywane przez wielu myślicieli; historja zaś, zapominając nieraz o poprzednikach, wiąże nową ideę z nazwiskiem tego, który dał jej wyraz ostateczny w chwili, gdy idea już dojrzała i otoczenie dorosło do jej przyjęcia.

Wiek odrodzenia jest epoką dojrzewania wielkich idej, poczętych w starożytności. Idee te w dziedzinie mechaniki wyraz swój znalazły przedewszystkiem w pracach Kopernika, Galileusza i Newton'a, kiełkowały one jednak również w umysłach innych, mniej znanych uczonych, im współczesnych, a nawet ich poprzedników. Poniżej przytoczone są życiorysy i wyjątki z dzieł tych uczonych, którzy pracami swemi najbardziej przyczynili się do zbudowania mechaniki nowoczesnej.

LEONARDO DA VINCI.

(1452 — 1519).

Leonardo da Vinci (rys. 7), malarz, rzeźbiarz, architekt, technik, muzyk, przyrodnik i fizyk był chyba największym i najwszechstronniejszym genjuszem świata; przerastał on o całe niebo swoją epokę, stał ponad nauką współczesną, lecz, niestety, również niemal poza wszelkim wpływem na jej rozwój. Potężna jego indywidualność nie jest ogniwem historji; słusznie ktoś o nim powiedział, że pod względem duchowym nie miał on ani przodków, ani potomków.

Leonardo urodził się w miasteczku Vinci w pobliżu Florencji, ojcem jego był notarjusz miejscowy, matką prosta kobieta wiejska. O dzieciństwie jego i młodości mało mamy wiadomości; wiemy z urywków pamiętnika, że uczył się matematyki i języka łacińskiego. Ojciec oddał go do znanego malarza, Andrea de Verrochio, na naukę



Rys. 7.

Leonardo da Vinci.

rysunku, malarstwa, rzeźby, odlewnictwa i mozaiki. Następnie Leonardo pracuje jako malarz. W roku 1482 przenosi się z Florencji do Medjolanu, na dwór Sforzy, któremu zaofiarował swe usługi w kwestji budowy mostów, okrętów, machin oblężniczych i innych przedmiotów kunsztu wojennego, a także wznoszenia gmachów, budowania wodociągów, osuszania bagien i przeprowadzania innych urządzeń czasów pokojowych. Oferta jego zostaje przyjęta i Leonardo przebywa w tym charakterze aż do r. 1498 przy dworze Sforzów, jednocześnie zajmuje się malarstwem i modeluje w glinie konny wizerunek

Franciszka Sforzy, które to arcydzieło nigdy, niestety, nie zostało odlane.

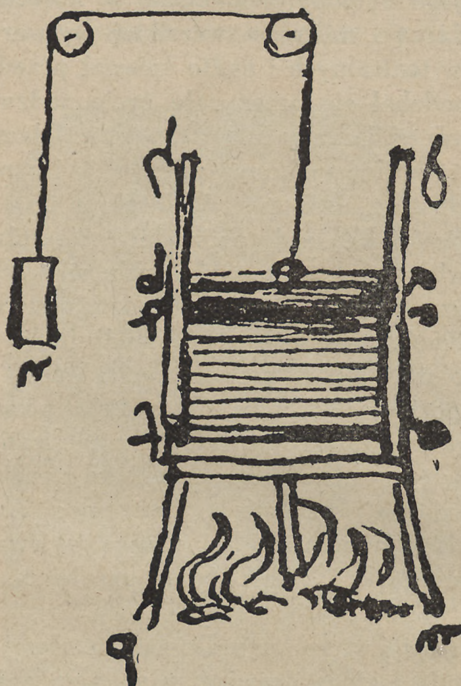
Oto jak współczesny mu Paweł Giovio kreśli charakterystykę Leonarda: „Był umysłem czarującym, prześwietnym, zgoła wspaniałym; oblicze jego było najpiękniejsze w świecie. Ponieważ był cudownym wynalazcą i mistrzem wszelkiej wytworności, a przedewszystkiem zabaw teatralnych i nadto śpiewał przedziwnie, wtórując sobie na lutni, podobał się przez całe życie nadzwyczajnie książętom". Był przytem obdarzony siłą niezwykłą: „łamie jak ołów żelazne pierścienie i końskie podkowy palcami, które mimo to posiadały dotknięcie tak delikatne, że w grze na lutni nie miał sobie równego".

Po upadku Sforzów Leonardo prowadzi życie tułacza, nie przerywając ani na chwilę swych prac naukowych; w r. 1502 zostaje generalnym inżynierem u Cezara Borgii, ma nadzór nad twierdzami i przeprowadza fortyfikacje, w tymże czasie studjuje lot ptaków i wykonuje szkice samolotów i śrub powietrznych. Wtedy maluje też znany przepiękny portret Giocondy. W r. 1506 powraca do Medjolanu, jako nadworny malarz i inżynier króla francuskiego Ludwika XII, pracuje w tym czasie nad matematyką i anatomją. Od r. 1516 przebywa Leonardo na obczyźnie w Cloux pod Ambre na służbie u króla francuskiego Franciszka I, pracując wytrwale nad wynalazkami technicznemi. Śmierć, poprzedzona paraliżem, następuje w roku 1519.

Leonardo da Vinci jest jakby prekursorem nowej fizyki. W badaniach swych stosuje metodę doświadczalną, wyniki ich ubiera w formę matematyczną, usiłując sprawdzić je przy pomocy dedukcji naukowej. Znanem mu jest pojęcie siły, momentu siły, mówi o ciężkości, o ruchu przyśpieszonym, studjuje prawa tarcia, prawa spadku ciał, prawa ruchu cieczy, nieobcem mu jest pojęcie prężności pary, które stosuje w armatach parowych, oraz pojęcie o oporze powietrza, na którem buduje swoją teorję machin latających. Nie uznaje teorji geocentrycznej. W jego rękopisach znajduje się mnóstwo mistrzowskich szkiców technicznych, a więc plany fortyfikacji, kanalizacji, mostów, budowli, statków, krany do podnoszenia ciężarów, różnego typu armaty i pociski, piece hutnicze, pompy, świdry, piły kamieniarskie, walcownie żelaza, szlifierki, heblarki, wiertarki, koła zębate różnego typu, maszyna drukarska, młyny wietrzne, rożen samoobracający, instrumenty muzyczne, cyrkiel proporcjonalny, krokomierz, hygrometr, machina parowa (rys. 8) i t. d.

Podczas swego pracowitego życia Leonardo spisywał i szkicował

wszystkie swe bogate pomysły z różnych dziedzin swej twórczości. Pisał lewą ręką, od prawej strony ku lewej, tak że pismo jego daje się czytać w zwierciadle. W testamencie szkice swe i rekopi-



Rys. 8.

Machina parowa.

sy zapisał uczniowi swemu, Franciszkowi Melzi, który przewiózł je z Francji do Włoch. Po śmierci Melzi'ego papiery te zostały częściowo rozproszone lub zniszczone, częściowo zaś pozostały nieznane. W r. 1797 Venturi ogłosił drukiem prace matematyczno - fizyczne Leonarda da Vinci. Sam Leonardo wspomina w jednem miejscu o stu kilkudziesięciu księgach. Wymienia on księgę o ruchu, o uderzeniu, o ciężarze, o momencie siły, o elementach maszyn, o locie ptaków i inne. Do nas doszły one przeważnie w stanie fragmentarycznym, pisane były zresztą na luźnych kartkach różnego formatu w formie aforyzmowej. W chwili obecnej spuścizna literacka po Leonardzie da Vinci składa się z pięciu tysięcy stron rękopisu.

Oto wyjątki z pism naukowych Leonarda:

O metodzie naukowej.

„Zanim wysnujesz z tego wypadku prawidło ogólne, doświadcz go dwa lub trzy razy, bacząc, czy doświadczenie wywołuje te same skutki".

„Lecz, nim pójdę dalej, zrobię wpierw kilka doświadczeń, gdyż zamiarem mym jest przeprowadzić wpierw doświadczenie, a potem na podstawie przyczyny wykazać, dlaczego takie doświadczenie musi się odbyć w ten sposób. I to jest właśnie prawidło, wedle którego postępować winni badacze działań natury, a choć natura zaczyna od przyczyny, a kończy na doświadczeniu, my musimy postępować odwrotnie, to jest zaczynać — jak się rzekło wyżej — od doświadczenia i z jego pomocą badać przyczynę".

„Mądrość jest córką doświadczenia".

„Doświadczenie nie zwodzi nigdy; błądzą jeno nasze sądy, obiecując sobie po niem wynik taki, jaki nie może mieć uzasadnienia w naszych doświadczeniach".

„Żadne badanie ludzkie nie może zwać się wiedzą prawdziwą, jeśli nie przeszło próby doświadczenia matematycznego. A jeśli powiesz, że umiejętności, które zaczynają i kończą się w głowie, są prawdziwe, nie można zgodzić się na to".

O mechanice i matematyce.

„Mechanika jest rajem nauk matematycznych, gdyż przez nią dochodzi się do owoców matematyki".

„Niema zgoła pewności tam, gdzie nie można zastosować jednej z nauk matematycznych, lub tych, które związane są z matematyką".

O sile, ruchu i bezwładności.

„Żadna rzecz martwa nie porusza się sama przez się, lecz ruch jej wywołany jest przez inne".

„Każdy ruch naturalny i ciągły pragnie zachować swój bieg na linji swego początku, to znaczy każde miejsce, w którem się zmienia, nazywam początkiem".

„Każdy ruch pragnie utrzymać się, lub raczej:

Każde ciało poruszone porusza się ciągle, o ile pobudka mocy poruszającej w niem się zachowuje".

„Jeżeli jakaś siła poruszy jakieś ciało w pewnym czasie po pewnej przestrzeni, to ta sama siła poruszy połowę tego ciała w tym samym

czasie po przestrzeni dwa razy dłuższej, lub ta sama siła poruszy połowę tego ciała po całej tej przestrzeni w połowie tego czasu".

„Ciężar spadający na dół zyskuje w każdym stopniu czasu [jednostce czasu] o stopień ruchu więcej, niż stopień czasu przeszłego i tak samo o stopień szybkości więcej, niż stopień ruchu byłego. Przeto w każdej zdwojonej ilości czasu podwaja się długość spadku i szybkość ruchu".

[Leonardo popełnia tu błąd, gdyż drogi mają się do siebie, jak kwadraty czasów, droga więc, którą ciało przebiega w czasie dwa razy dłuższym, jest cztery, a nie dwa razy, dłuższa. W każdym razie wykrył on, że ruch ciał spadających jest przyśpieszony. Do wyników swych doszedł on na drodze doświadczalnej, zrzucając kloce drewniane z wieży kościelnej i znacząc na murze położenie ich w danym czasie].

O ziemi.

„Ziemia nie znajduje się w środku koła słonecznego, ani w środku świata, lecz jest w środku swych żywiołów, które jej towarzyszą i są z nią złączone".

„Książka moja stara się wykazać, że ocean z innemi morzami pozwala za pośrednictwem słońca lśnić naszemu światu na sposób księżyca i że najbardziej oddalonym zdaje się ona gwiazdą" [1]).

Maszyny do latania.

„Jednakową siłę wywiera się przedmiotem na powietrze, jak powietrzem na przedmiot. Widzisz, że rozpostarte na powietrzu skrzydła sprawiają, że ciężki orzeł opiera się na rzadkiem powietrzu i wzbija się w sfery ogniste [najwyższe]. Widzisz również, że poruszane nad morzem i odrzucane przez wzdęte żagle powietrze pcha naprzód ciężki, naładowany okręt. Możesz więc z tych wyjaśniających, przytoczonych tu przyczyn wywnioskować, że człowiek, wywierając swemi dużemi rozpostartemi skrzydłami siłę na opierające się powietrze, może je zwyciężyć, poddać sobie i wzbić się ponad nie".

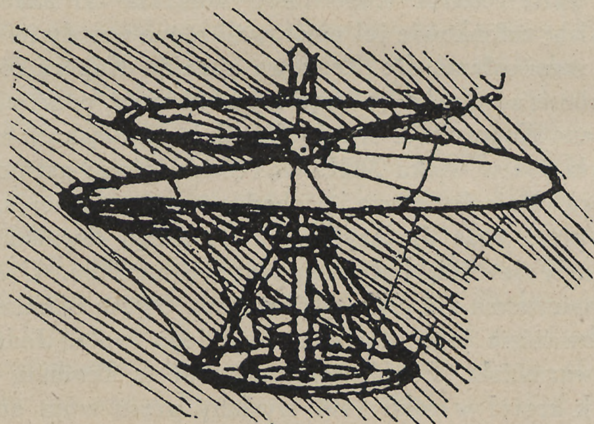
„Pamiętaj, że twój [sztuczny] ptak musi naśladować nietoperza, gdyż jego skórka stanowi armaturę, a raczej połączenie armatury, czyli główny żagiel skrzydeł. Nietoperzowi pomaga skórka, która wszystko łączy i nie jest podziurkowana [jak skrzydła ptaków]".

---

[1]) Wyjątki te wzięte są z dzieła „Leonardo da Vinci. Pisma wybrane. Wybór, układ, przekład i wstęp Leopolda Staffa".

Spadochron. „Jeżeli człowiek posiada namiot z nieprzepuszczalnego płótna dwanaście łokci szeroki i dwanaście wysoki, to będzie on mógł spuścić się z dowolnej wysokości bez wszelkiego niebezpieczeństwa".

Śruba powietrzna (rys. 9). „Uważam, że jeśli przyrząd ten, mający kształt śruby, będzie dobrze wykonany, to jest z płótna, którego pory zasklepione są krochmalem, i jeżeli będzie się szybko obracał, to



Rys. 9.

Śruba powietrzna.

śruba ta wkręci się w powietrze i wzniesie się w górę. Zewnętrzny brzeg śruby powinien być zrobiony z drutu żelaznego grubości sznura, zaś od obwodu do środka powinna mieć ośm łokci [czyli promień śruby ma się równać 8 łokciom]. Usztywnić to [płótno] można przy pomocy szkieletu z długich cienkich rurek. Można sporządzić sobie z papieru mały model, którego oś stanowi cienka blaszka żelazna, która została gwałtownie skręcona; jeśli ją puścimy — wprawi ona śrubę w ruch obrotowy" [1]).

---

[1]) Franz M. Feldhaus. „Leonardo der Techniker u. Erfinder".

MIKOŁAJ KOPERNIK.

(1473 — 1543)

Jedną z największych i najpłodniejszych idej naukowych epoki odrodzenia była idea heliocentryczna, dotycząca układu i ruchu ciał niebieskich. Twórcą jej był Polak — Mikołaj Kopernik. Urodził się on w Toruniu, który znajdował się wówczas pod berłem polskiem. Ojciec jego, również Mikołaj, przeniósł się do Torunia z Krakowa, gdzie rodzina Koperników należała do znanych rodzin mieszczańskich; członkowie jej piastowali różne urzędy miejskie i zajmowali się rzemiosłami. Do Krakowa rodzina Koperników przeszła prawdopodobnie ze Śląska (a więc ziemi również polskiej), z osady, noszącej miano Kopernik, która do dziś dnia na Śląsku istnieje, a wymienianą była już w wieku XIII. W Toruniu ojciec astronoma ożenił się z Barbarą Wajselrodówną, pochodzącą z zamożnej szlachty pomorskiej, i przez czas dłuższy zajmował urząd ławnika. Brat Barbary, Łukasz Wajselrod, był biskupem warmińskim. O dzieciństwie przyszłego astronoma nic prawie nie wiemy. Ojciec odumarł go dzieckiem, wychowaniem jego oraz starszego jego brata, Jędrzeja, zajął się biskup warmiński. Po ukończeniu szkół w Toruniu, Mikołaj Kopernik został w roku 1491 wysłany przez wuja do Akademji Krakowskiej, gdzie przez dwa lata studjował medycynę oraz nauki matematyczne; zajmował się też malarstwem.

Jednym z profesorów Akademji był Wojciech z Brudzewa, znakomity astronom i matematyk, którego wykład ściągał do Krakowa młodzież z Czech, Węgier, Niemiec, a nawet ze Szwecji; wywarł on prawdopodobnie wpływ na dalszy kierunek myśli Mikołaja. W r. 1493 powrócił Kopernik na Pomorze i powziął myśl, aby śladem wuja obrać zawód duchownego. W owych czasach zawód ten najbardziej sprzyjał badaniom naukowym, zapewniając spokój i niezależność; wielu profesorów, lekarzy, poetów i filozofów należało do stanu duchownego. W r. 1495 udał się Mikołaj do Włoch dla wydoskonalenia się w medycynie i filozofji. Na uniwersytecie w Padwie zapisał się do albumu Polaków; z Padwy robił częste wycieczki do Bononji, gdzie zajmował się obserwacjami astronomicznemi razem ze znanym wówczas astronomem Dominikiem Marją z Ferrary. W roku 1499 doktoryzował się w Padwie z filozofji i medycyny. W tym czasie biskup warmiński mianował obu swych siostrzeńców kanonikami i wyjednał u kapituły fundusze na dalszą ich edukację; to też po krótkim pobycie w kraju Mikołaj wraca do Włoch, gdzie, przed-

stawiony przez Dominika z Ferrary papieżowi Aleksandrowi VI-mu, otrzymuje katedrę matematyki i astronomji w Rzymie. Podanie głosi, że wykłady jego cieszyły się liczną frekwencją; pomimo tego powraca on w r. 1503 do Krakowa, gdzie przyjmuje święcenie kapłańskie.

W czasie pobytu we Włoszech Kopernik, prócz wydoskonalenia się we współczesnych mu metodach badań astronomicznych, miał sposobność zetknięcia się z literaturą starożytną i teorjami uczonych greckich, dotyczącemi budowy świata. Tu już szukać należy narodzin wielkiej idei o obrocie ziemi i ciał niebieskich, która zapewnić miała Kopernikowi nieśmiertelność. W epoce przed Kopernikiem wszechwładnie panował w nauce astronomicznej system Ptolomeusza, system geocentryczny, t. j. przypisujący ziemi centralne stanowisko we wszechświecie. Ptolomeusz, urodzony w Egipcie, żył w Aleksandrji w II w. po Chr. Ujął on w system spostrzeżenia dawniejszych astronomów, głównie Hipparcha. Księga jego w r. 827 została przełożona na język arabski i znana jest pod arabską nazwą Almagestu. Według księgi tej, nieruchoma ziemia znajduje się w środku wszechświata, a dokoła niej po epicyklach krąży księżyc, słońce i planety. Epicykle te były to krzywe tak skomplikowane, że sam Ptolomeusz miał się wyrazić, że „łatwiej chyba poruszać planety, niż pojąć ich ruch złożony". Astronomowie i matematycy zwalczali teorje obrotu ziemi które istniały już przed Ptolomeuszem. Miały one być pochodzenia egipskiego i rozwijane były przez Pitagorasa (582—500 przed Chr.) i filozofów greckich szkoły pitagorejskiej. Wznowione zostały przez Arystarcha ok. r. 280 przed Chr., tak jednak odbiegały od ustalonych w tym czasie pojęć, że naraziły Arystarcha na prześladowania religijne, a następnie zostały zupełnie zapomniane.

Z tymi poglądami astronomów starożytnych zapoznał się Mikołaj Kopernik we Włoszech.

Po powrocie z Włoch w r. 1503 Kopernik osiadł w Krakowie, nawiązał stosunki z uczonymi, którzy gromadzili się koło Akademji Krakowskiej, i tu również w r. 1507 rozpoczął swoje wielkie dzieło „O obrotach ciał niebieskich".

W r. 1509 biskup Łukasz Wajselrod powołał go do Warmji, do Frauenburga, gdzie odtąd przez lat 33 stale przebywa, biorąc, obok zajęć naukowych, czynny udział w sprawach publicznych.

W r. 1523 został wybrany na administratora djecezji i bronił kapituły od zakusów krzyżackich. W r. 1526 opracował na żądanie króla Zygmunta Starego rzecz „De optima monetae cadendae", zawierającą projekt uregulowania kwestji mennicznej na Pomorzu.

Koło roku 1526 Kopernik zdał rządy kapituły Ferberowi, sam zaś oddał się znowu medycynie (bezinteresownie lecząc i wspierając ubogich) oraz astronomji. Przy kościele Frauenburskim zbudował obserwatorjum; drugie, mniejsze obserwatorjum astronomiczne, miał na wsi w Obertynku, który wziął w zarząd od kapituły. Dom mieszkalny w Obertynku urządził Kopernik odpowiednio do pracy naukowej.

Tu dojrzała wielka idea Kopernika. Nie spieszył się jednak z ogłoszeniem jej. Nie chciał się narażać na zatarg z Watykanem, gdyż twierdzenie jego wydawało się sprzeczne z biblijnem powiedzeniem Jozuego „Stój słońce", władze zaś kościoła katolickiego, narażone w tym czasie na walkę z reformacją, mogły w idei jego dopatrywać się nowego odszczepieństwa. Jednak treść idei jego, rozchodząc się drogą prywatną, dotarła do uczonych zachodnio-europejskich (Erazma z Rotterdamu) i do Rzymu. Kopernik w r. 1536 odebrał od Kardynała Mikołaja Schemberga z Rzymu list, zachęcający go do ogłoszenia dzieła drukiem. Uczeni niemieccy wysłali w r. 1539 Jerzego Rethika, profesora matematyki z Wittenbergu, do Kopernika, u którego spędził on czas pewien, zapoznając się z treścią jego dzieła. W r. 1540 Rethik ogłosił drukiem streszczenie trzech pierwszych ksiąg dzieła Kopernika. Wreszcie Kopernik, ulegając namowom przyjaciół, zdecydował się na wydanie swego dzieła i napisał przedmowę do papieża Pawła III, w której podaje genezę swojego odkrycia.

Papież, znawca matematyki, dedykację przyjął i w nauce Kopernika nie widział błędu. Dopiero w r. 1616 została ona potępiona przez kongregację Indexu[1]). Dzieło Kopernika drukowane było w Norymberdze, zajęli się tem uczeni niemieccy Osiander i Jan Schoner i pierwszy jego egzemplarz przesłali do Frauenburga dogorywającemu autorowi. Kopernik zmarł w r. 1543 w wieku lat 70.

Dzieło „De revolutionibus orbium caelestium" pisane było po łacinie. Treść jego dzieli się na sześć ksiąg. Zawiera ono z dzisiejszego stanowisko nauki pewne błędy (Kopernik przypisywał naprzykład planetom bieg kołowy); błędy te zostały w następstwie poprawione przez Kepplera (1571—1630). Wielka idea Kopernika zapłodniła umysły późniejszych badaczy i doprowadziła w dalszej konsekwencji Newtona do odkrycia ciążenia powszechnego.

---

[1]) Pisma Kopernika zostały skreślone z indeksu w r. 1835.

O obrotach ciał niebieskich[1].

Przedmowa do papieża Pawła III[2].

...Wasza Świętobliwość nie będzie może tak bardzo zdziwiona, że odważyłem się pokazać na światło dzienne te moje nocne prace, dla wypracowania których zadałem sobie tyle trudu, lecz chciałaby raczej usłyszeć odemnie w jaki sposób przyszło mi na myśl, wbrew dotychczasowym poglądom i wbrew ogólnoludzkiemu rozumowi — że ziemia może się poruszać. Dlatego niechcę ukrywać przed Waszą Świętobliwością, że do zastanowienia się nad nowym sposobem obliczania ruchów ciał niebieskich skłoniło mnie to, że astronomowie, w swoich badaniach nad tem, nie zgodzili się ze sobą. Gdyż popierwsze, tak niepewni są ruchu słońca i księżyca, iż nie mogą z nich wyprowadzić długości pełnego roku. Powtóre, stosują oni przy ustaleniu ruchów słońca, księżyca i pięciu planet niejednakowe założenia i wnioski, a także dowodzenia. Jedni z nich posługują się, mianowicie, tylko koncentrycznemi, inni excentrycznemi kołami lub epicyklicznemi krzywemi, nie osiągając jednak w zupełności celu. Nie mogli oni również, co najgłówniejsze, znaleźć ani obliczyć budowy świata i symetrji jego części. Wypadało to tak, jakby ktoś, zebrawszy z różnych miejsc ręce, nogi, głowę i inne członki, narysowane coprawda bardzo pięknie, ale w niewłaściwej proporcji, zestawił z nieodpowiadających sobie części całość, przypominającą raczej monstrum, niż kształt człowieczy.

Kiedy długo rozmyślałem nad temi przekazanemi nam niejasnościami, zadałem sobie trud przeczytać książki wszystkich filozofów, które tylko mogłem dostać, ażeby poszukać, czy który z nich nie był kiedy zdania, że ruchy ciał niebieskich odbywały się inaczej. Znalazłem tam, przedewszystkiem u Cycerona, że ktoś myślał, że ziemia się porusza. Następnie znalazłem również u Plutarcha, że inni byli również tego zdania. Pobudzony przez to, zacząłem i ja rozmyślać o ruchu ziemi, jakkolwiek pogląd taki zdawał się być przeciwnym zdrowym zmysłom. Wiedziałem, że inni przedemną mogli swobodnie przyjmować dowolne ruchy kołowe celem wyjaśnienia zjawisk niebieskich. Byłem tego zdania, że i mnie chyba będzie wolno spróbować, czy przez przypuszczenia jakiegokolwiek ruchu ziemi nie da się znaleść bardziej prawdopodobnego, niż dotychczas, wyjaśnienia ruchu

---

[1] „Nicolai Copernici, Torunensis, de Revolutionibus orbium coelestium Libri sex". Dzieło wydane w Norymberdze w r. 1543.

[2] Dannemann. „Aus der Werkstätte grosser Forscher".

ciał niebieskich. Tak więc, przez przyjęcie ruchu, który w pracy niniejszej przypisuję ziemi, i przez liczne i długotrwałe obserwacje znalazłem wreszcie, że jeśli ruchy innych planet odnieść do obrotu ziemi i ten uważać za podstawę obrotów innych ciał niebieskich, wynikną z tego nietylko zjawiska dotyczące planet, lecz, że wtedy również prawa i wielkości innych ciał niebieskich, oraz ich tory i całe niebo tak się ze sobą powiążą, że w żadnej ich części, bez zamieszania części pozostałych i całego wszechświata, nie dałoby się nic zmienić. Nie wątpię, iż mądrzy i uczeni matematycy zgodzą się ze mną, jeśli gruntownie poznają i rozważą, co przytoczonem zostało w dziele niniejszem na poparcie tych rzeczy. Aby jednak zarówno uczeni jak i nieuczeni widzieli, iż nieobawiam się niczyjego sądu, chciałem przeto te moje prace nocne poświęcić raczej Waszej Świętobliwości, niż komu innemu, gdyż również w tym zapadłym kącie ziemi, w którym ja działam, uważanym Jesteś za najwyższego, zarówno z powodu Twego stanowiska, jak i miłości dla wszelkiej wiedzy, że przeto przez Twoje uznanie i sąd Twój łatwo zagłuszyć możesz ukąszenia oszczerców, jakkolwiek mówi przysłowie, że przeciw oszczercom niema środków.

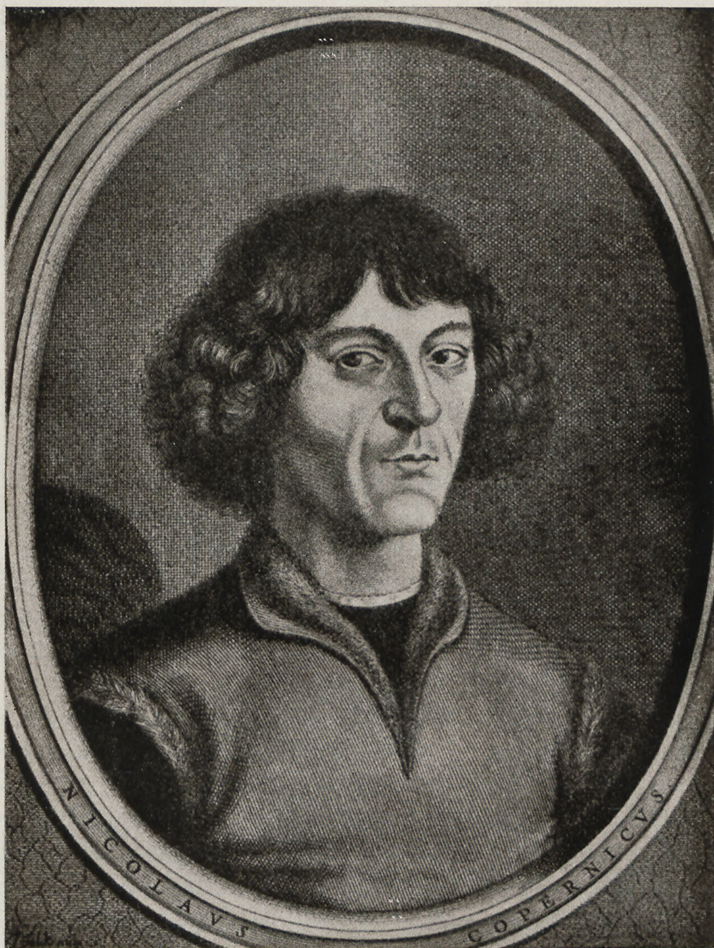
Czy ziemia podlega biegowi kołowemu i o miejscu jej w przestrzeni [1].

Ponieważ okazaliśmy, że ziemia ma postać kulistą, uważam za rzecz potrzebną dochodzić, czy i bieg odpowiada jej postaci, oraz jakie miejsce ziemia zajmuje w przestrzeni świata, bez czego niepodobna jest wskazać prawdziwej przyczyny dostrzeganych zjawisk niebieskich. Lubo uczeni zwykle zgadzają się na to, że ziemia w środku świata spoczywa, tak iż uważają za rzecz nieprzypuszczalną, a co większe nawet za śmieszną, przeciwnie utrzymywać; wszelako, jeżeli nad tym przedmiotem pilniej się zastanowimy, pokaże się to zadanie jeszcze nie rozwiązanem, i dlatego pomijać go nie wypada.

Każda bowiem dostrzegana zmiana w położeniu ciał następuje albo wskutek ruchu ciała uważanego, albo ruchu postrzegacza, albo przynajmniej od nierównej zmiany ich obydwóch; gdyż między ciałami w tymże kierunku jednostajnie bieg odbywającemi nie dostrzegamy zmiany między przedmiotem uważanym, a dostrzegaczem. Ziemia jest stanowiskiem, z którego ów bieg uważamy i który się oczom naszym

[1]) Przekład Jana Baranowskiego, wydany w Warszawie w r. 1854.

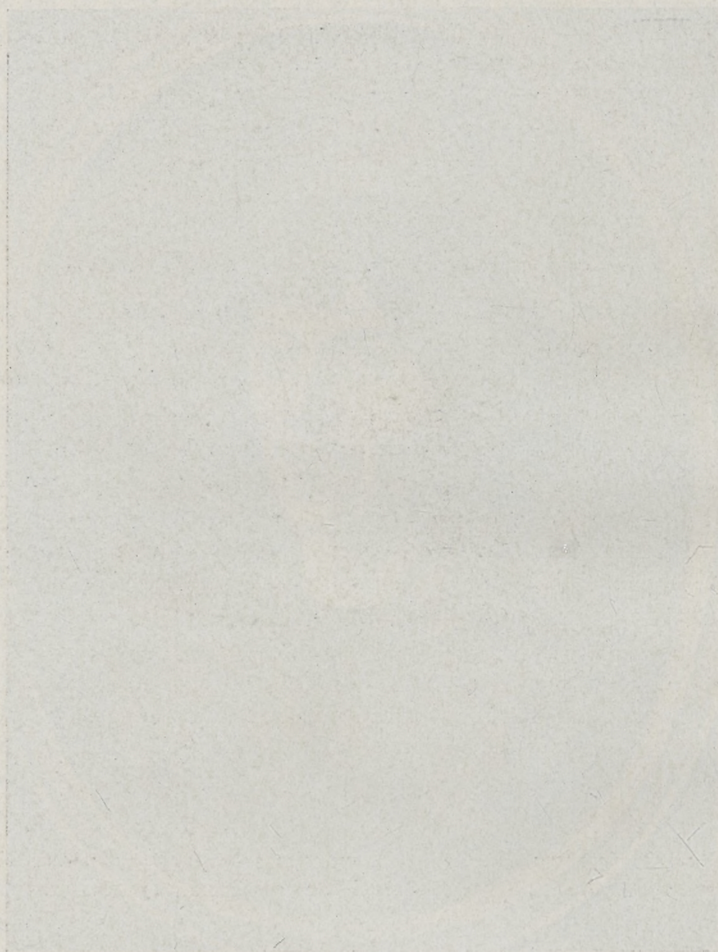
Dzieje rozwoju fizyki. T. I.



MIKOŁAJ KOPERNIK

Wyd. „Mathesis Polska".





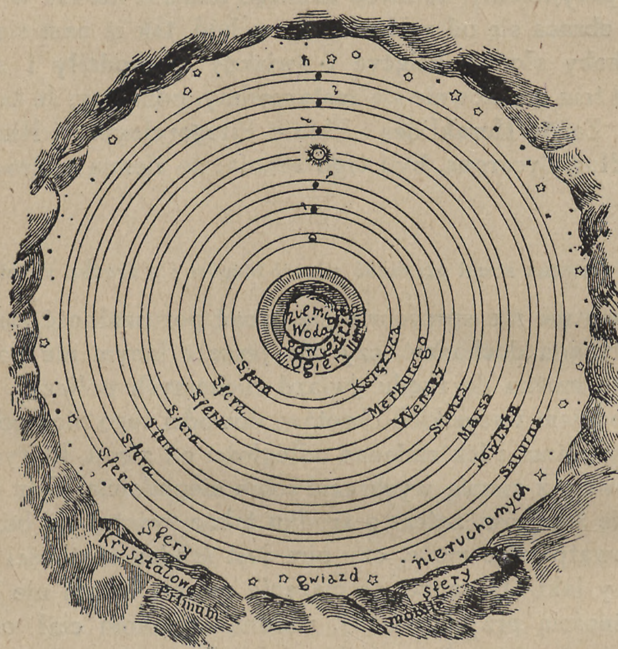
przedstawia. Jeżeli więc jaki bieg ziemi przyznamy, bieg ten we wszystkich ciałach zewnątrz niej położonych okazać się powinien, lecz w kierunku przeciwnym, jak gdyby te ciała koło niej się przesuwały, co też właśnie przed innemi pokazuje obrót dzienny nieba. Ruch ten zdaje się całe niebo unosić, wyjąwszy ziemię i ciała koło niej będące. Jeżeli zaś przyjmiemy, że niebo żadnego udziału nie ma w tym biegu, ale ziemia obraca się od zachodu na wschód, tak iż nam się wydawać będzie, jakoby słońce, księżyc i gwiazdy wschodziły i zachodziły, i jeżeli nad tem gruntownie się zastanowimy, poznamy, że tak jest rzeczywiście... Zaiste Heraklides i Ekfant Pitogorejczycy i Nicetas z Syrakuzy podług Cycerona, byli tego zdania: że ziemia w środku świata obraca się...

Czy można ziemi przyznać więcej biegów i o środku świata.

Gdy zatem nic nie sprzeciwia się uznać poruszalność ziemi, sądzę, że teraz wypada dochodzić, czy ona jeszcze innym nie podlega biegom, aby ją można do rzędu gwiazd ruchomych policzyć. Że ziemia nie jest środkiem wszystkich obrotów, dowodzi tego bieg pozorny niejednostajny planet i ich zmienne odległości od ziemi, których na kole spółśrodkowem z ziemią wyobrazić sobie niepodobna. Gdy więc wiele znajduje się środków, zatem o środku także świata, nie bez przyczyny ktoś powątpiewać może, czy nim jest środek ciężkości ziemskiej, lub też inny jaki. Ja sądzę, że ciążenie niczem innem nie jest, tylko pewną dążnością przyrodzoną [1]), nadaną cząstkom ciał od Boskiej Opatrzności, sprawczyni wszystkiego, ażeby te do jedności i całości zmierzały, i łączyły się z sobą w postaci kuli. Można sądzić, że słońce, księżyc i inne planety obdarzone są tą własnością, aby skutkiem jej utrzymywały się w tej kulistości, w jakiej się przedstawiają, a pomimo to jednak w różny sposób odbywają swe biegi. Jeżeli więc ziemia odbywa inne biegi, jak naprzykład około środka, takowe koniecznie okaże się w wielu ciałach zewnątrz położonych, a przedewszystkiem w biegu rocznym słońca. Jakoż, jeżeli zamiast biegu słońca, położymy bieg ziemi, a słońce będziemy uważać za nieruchome, wtedy wschód i zachód znaków zwierzyńcowych i gwiazd stałych, czyniący je rannemi i wieczornemi, tymże samym sposobem nam się przedstawia. Również stanowisko planet, ich biegi wsteczne i kierunkowe, okażą się nie od nich, ale od biegu ziemi zależnemi, którą one do swych pozor-

[1]) Słowa te świadczą o tem, że sama idea ciążenia powszechnego była znaną Kopernikowi.

nych biegów od niej przybierają. Na ostatek, słońce samo uważać będziemy w środku świata stojące. Czego wszystkiego uczy nas prawo porządku, według którego ciała niebieskie po sobie następują, i harmonja całego świata, bylebyśmy na to pilną uwagę zwrócili.



Rys. 11.

Układ planetarny podług Ptolomeusza.

Porządek ciał niebieskich.

Z rozdziału tego przytaczamy rysunek (rys. 10), wyobrażający układ planetarny według systemu K o p e r n i k a; dajemy dla porównania wyobrażenie układu planetarnego według Ptolomeusza (rys. 11), oraz rysunek, ilustrujący prawa Keplera [1] (rys. 12), następnie przytaczamy urywek tekstu, którego pewne

---

[1]) Prawa Keplera (r. 1609):

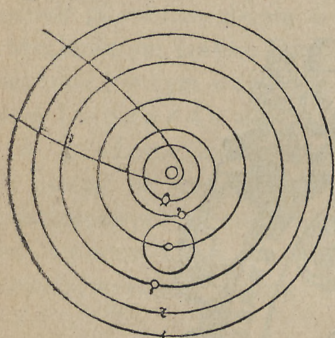
1. Każda planeta krąży około słońca po elipsie, a słońce znajduje się w jednem z jej ognisk.

2. Promień wodzący każdej planety zakreśla w równych czasach pola równe.

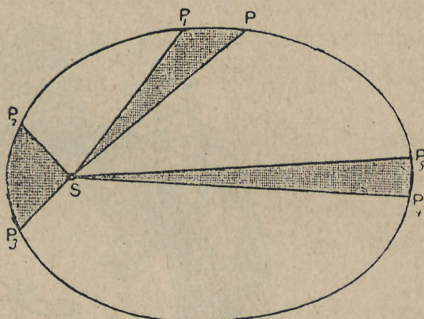
3. Kwadraty okresów obiegu dwu planet są proporcjonalne do sześcianów ich średnich odległości od słońca.

ustępy zawierają zasady metodyczne, rozwinięte następnie przez Newtona w jego „Prawidłach badania przyrody".

„Ponieważ słońce jest niewzruszone, wszelki bieg pozorny w niem dostrzegany, przez rzeczywisty bieg ziemi tłumaczyć się daje. Ogrom świata jest tak wielki, że lubo owa odległość ziemi od słońca, względnie od wielkości dróg innych planet ma stosunek widoczny, porównana



Rys. 10.
Układ planetarny podług Kopernika.



Rys. 12.
Prawa Keplera.

jednak z wielkością sfery gwiazd stałych, zdaje się być niczem; na co łatwiej, jak sądzę, można przystać, aniżeli zatrudniać umysł nieskończoną prawie liczbą sfer, co też właśnie zmuszeni są czynić ci, którzy ziemię w środku świata zatrzymali. Najwłaściwiej jest postępować za przezorną przyrodą, która najmocniej się strzegła tworzyć coś zbytecznego, lub nieużytecznego, a często jedną rzecz obdarzyła wielorakimi skutkami[1]).

STEVIN.

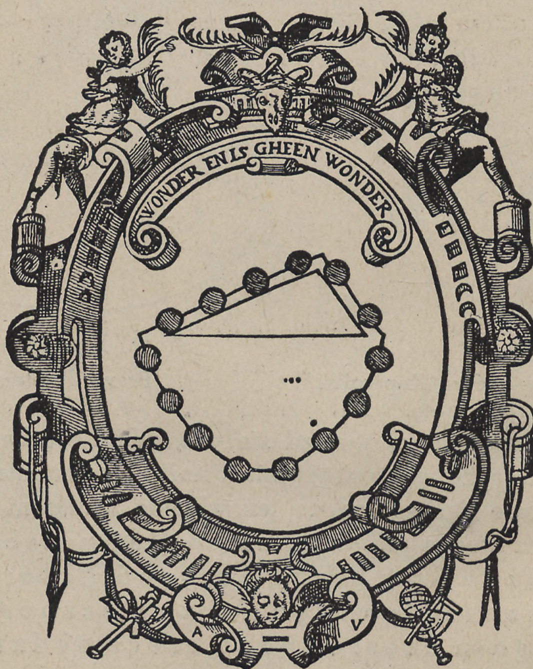
(1548—1620).

Bezpośrednim poprzednikiem Galileusza w pracach na polu mechaniki był flamandczyk, Szymon Stevin, urodzony w Bruges we Flandrji w r. 1548.

Pracował on początkowo w zawodzie handlowym w Bruges i Antwertpji, jako buchalter i kasjer u jednego z kupców, następnie po-

[1]) Porówn. Newtona „Prawidła badania natury". — Prawidło I.

dróżował po Prusach, Szwecji, Norwegji i Polsce, poczem osiadłszy w Niderlandach zapisał się na uniwersytet w Leydzie, gdzie studjował matematykę i nauki ścisłe. Był później profesorem matematyki, intendentem finansów księcia Maurycego Nassauskiego, generalnym kwatermistrzem armji niderlandzkiej, inspektorem obwałowań nadmorskich i urządzeń hydrotechnicznych. Wprowadził on nowy system do rachunkowości państwowej. Z dzieł technicznych dały mu rozgłos



Rys. 13.
Równia pochyła Stevina.

prace o fortyfikacjach i sztuce wojskowej. W r. 1600 zbudował wóz żaglowy, który, pędzony przez wiatr, miał szybkość większą, niż wozy konne.

Dzieło jego matematyczne „Le Disme", wydane w r. 1585, zawiera pierwszą ideę ułamków dziesiętnych; żąda on również zastosowania systemu dziesiętnego do miar i wag.

Z prac naukowych w dziedzinie fizyki największe znaczenie mają zdobycze w dziedzinie statyki i hydrostatyki. Opierają się one na pracach Archimedesa i Herona.

Oryginalną zwłaszcza jest jego teorja równi pochyłej, przytoczona poniżej wraz z rysunkiem (rys. 13), pomieszczonym w środku tarczy herbowej i zdobiącym kartę tytułową dzieła „Hypomnemata mathematica", wydanego w przekładzie łacińskim w r. 1665. Właściwie statyka Stevina ogłoszona była po raz pierwszy w r. 1586, ponieważ jednak pierwotne dzieła Stevina drukowane były w mało rozpowszechnionym języku flamandzkim, pozostały one przez dłuższy czas nieznane i w tym względzie los dzieł Stevina przypomina nieco los pism Leonarda da Vinci.

W dziedzinie hydrostatyki zajmuje Stevina zagadnienie ciśnienia cieczy na dno i ścianki naczynia; w rozumowaniach swych hydrostatycznych stosuje metodę Archimedesa. Ma być on również autorem t. zw. paradoksu hydrostatycznego, niesłusznie jakoby przypisywanego Pascalowi.

Wyjątki z rozprawy o równi pochyłej [1].

Twierdzenie: „Na dwóch bokach trójkąta, którego płaszczyzna jest prostopadła, a podstawa równoległa do poziomu, umieszczone są dwie (związane nicią) kulki tej samej wielkości i ciężaru, przeciągające jedna drugą; ciężar pozorny kulki lewej ma się do ciężaru pozornego kulki prawej, jak długość prawego boku trójkąta do długości boku lewego" [ciężar pozorny oznacza tu składowe, równolegle do boków trójkąta].

Dowodzenie. „Niech będzie trójkąt *ABC*, w którym bok *AB* jest dwa razy dłuższy od boku *BC;* dwie kulki *D* i *E* (leżące na tych bokach) mają jednaką wielkość i ten sam ciężar, a chodzi o to, by dowieść, że ciężar pozorny kulki *E* jest dwa razy większy od ciężaru pozornego kulki *D.* Dodajmy w tym celu do tych dwóch kulek dwanaście takich samych kulek *F, G, H, I, K, L, M, N, O, P, Q, R* i połączmy je wszystkie równej długości nitkami, tworząc w ten sposób łańcuch, w którym nasze czternaście kulek rozstawione są w równych odstępach. Zarzućmy ten łańcuch na nasz trójkąt w ten sposób, że bok *AB* unosić będzie cztery, a bok *BC* tylko dwie kulki. Gdyby ciężar pozorny grupy czterech kulek *D, R, Q, P* nie był równy ciężarowi pozornemu grupy dwóch kulek *E, F,* jedna z tych grup przeważyłaby drugą. Przypuśćmy, że grupą przeważającą są cztery kulki *D, R, Q, P.* Kulki *O, N, M, L* ważą tyleż co kulki *G, H, I, K;* ciężar więc ośmiu kulek z lewej strony będzie większy od ciężaru sześciu

[1]) Feliks Kucharzewski „Mechanika".

z prawej i łańcuch się przesunie. Kulka *D* zejdzie na miejsce kulki *O*, kulki *E, F, G. H* zajmą miejsce kulek *P, Q, R, D*, a kulki *I, K* miejsce kulek *E, F*. Łańcuch będzie zajmował toż samo położenie, co i poprzednio, i skoro cztery kulki leżące na *AB* przeważają zawsze dwie na *BC*, to ruch łańcucha będzie wieczny, co jest niemożliwem. Ciężar więc pozorny czterech kulek na *AB* równoważy ciężar pozorny dwóch kulek na *BC*, czyli ciężar pozorny kulki *E* jest dwa razy większy od ciężaru pozornego kulki *D*, co było do dowiedzenia".

DESCARTES.

(1596 — 1650).

René Descartes (Kartezjusz), filozof, matematyk i fizyk współczesny Galileuszowi, urodził się w La Haye w Turenji, jako „seigneur du Perron", potomek znakomitego rodu. Nauki pobierał w Kolegjum jezuickiem w La Flèche, w r. 1617 pomimo wątłego zdrowia wstąpił na służbę wojskową i brał udział w kilku wyprawach i bitwach. Prowadził też przez czas pewien życie światowe. Wojsko porzuca w roku 1628. Zajęcia te jednak są dla niego czemś zewnętrznem, bierze w nich udział raczej jako obserwator, istotne znaczenie w życiu ma dla niego tylko praca jego myśli, której nie przerywa ani na chwilę; cały czas wolny poświęca rozmyślaniom filozoficznym i pracom naukowym. Jak wielką przypisywał im wagę świadczy fakt, że w r. 1623 odbył pielgrzymkę do Madonny Loretańskiej we Włoszech z intencją uproszenia pomocy w poszukiwaniu niewzruszonego kryterjum poznania.

Po wyjściu z wojska osiedla się w Holandji i przebywa tam przez lat 20. W czasie tym zmienia jednak 24 razy miejsce swego pobytu, aby uniknąć niepożądanych dla niego stosunków z ludźmi, odrywających od zajęć naukowych. Stanowisko jego zmusza go jednak do bywania na dworze w Haadze. W tym czasie odbywa również podróże do Anglji, Danji i Norwegji. Umiera w roku 1650 wskutek zaziębienia, w Sztokholmie, dokąd zaproszony został przez królowę szwedzką Krystynę w celach naukowych.

Descartes jako filozof usiłował dedukcyjnie wyprowadzić całą wiedzę ludzką z jednej niewzruszonej prawdy. Taką prawdą jest dla niego sam fakt myślenia. Formuła „cogito, ergo sum" (myślę, więc jestem) stanowi dla niego fundament, na którym w dziele swem

„Discours de la méthode" opiera istnienie Boga, przestrzeni i wszechrzeczy. Metoda jego rozumowawnia jest więc ściśle dedukcyjna. Taką też metodę, w przeciwstawieniu do Galileusza, stosował Descartes również w fizyce. Usiłował prawa fizyczne wyprowadzić z pewnych założeń matematycznych, sprowadzając pojęcia fizyczne do pojęć mechanicznych, zaś te otsatnie do elementów ściśle matematycznych. „Nie przyjmuję, powiada on, innych zasad w fizyce, które nie są też przyjęte i w matematyce", tak np. ciało fizyczne jest dla niego równoznaczne z częścią przestrzeni, materję zaś utożsamia z objętością, jest to dla niego „rozciągłość w długość, szerokość i głębokość". Na tej samej podstawie nie może też uznać próżni. Pogląd Descartes'a na próżnię przypomina nieco stosunek do niej Arystotelesa (str. 6). Pogląd taki doprowadza go do wielu sprzeczności, tak np. samo określenie ruchu ciał staje się niezrozumiałe, gdyż przestrzeń nie może wszak przenosić się z miejsca na miejsce.

Pomimo to fizyka zawdzięcza mu parę bardzo ważnych zdobyczy, mianowicie pierwsze sformułowanie zasady bezwładności oraz zasady zachowania pracy.

Pisze on w r. 1629 w liście do Mersenne'a, który był jego kolegą szkolnym i z którym utrzymywał stałą korespondencję naukową: „Najprzód przypuszczam, że ruch, raz nadany pewnemu ciału, trwa w niem wiecznie, jeżeli nie zostanie odjęty jaką inną przyczyną, czyli inaczej, to, co się zaczęło poruszać w próżni z tą samą prędkością poruszać się będzie nieskończenie (porówn. I prawo ruchu Newtona ogłoszone w r. 1686). Przypuśćmy więc, że ciężarek umieszczony w *A* popchnięty zostanie przez swoją ciężkość do *B*. Powiadam, że gdyby ciężkość przestała działać natychmiast po rozpoczęciu ruchu, to ciężarek zachowa ten sam ruch dopokąd nie dobiegnie do *C* i nie będzie spadał ani wolniej, ani prędzej od *A* do *B*, jak od *B* do *C*. Ale rzecz się ma inaczej, na ciężarek działa ciężkość, która go popycha wdół i która w każdej chwili daje mu nowy popęd do spadania. Wynika stąd, że ciężar przebiega przestrzeń *BC* znacznie prędzej, niż *AB*, gdyż do impetu, z którym się poruszał po *AB*, dochodzi inny, wytworzony przez ciężkość, którą popycha ciężar w każdej chwili (porównać II prawo ruchu Newtona, oraz doświadczenia Leonarda da Vinci i Galileusza nad spadaniem ciał)".

W r. 1637 przesyła Konstantemu Huygensowi, ojcu Christiana, „Objaśnienie machin, z których pomocą można przy użyciu małej siły podnosić znaczne ciężray", w którem pisze: „Siła, mogąca podnieść ciężar np. 100 funtów do wysokości 2 stóp, może także podnieść 400

funtów na wysokość $^1/_2$ stopy". Na tej zasadzie opiera Descartes teorję bloku, równi pochyłej, klina, kołowrotu, śruby i dźwigni.

Jako matematyk, zajmuje Descartes jedno z wybitniejszych miejsc pomiędzy matematykami wszystkich czasów. Prócz innych zdobyczy na tem polu, jest on twórcą geometrji analitycznej, podaje sposoby rozwiązywania równań algebraicznych sposobem geometrycznym i odwrotnie, stosuje analizę algebraiczną do zadań geometrycznych. Jemu zawdzięcza również matematyka system znakowania, używany do dnia dzisiejszego.

W mechanice nieba stworzył on słynną, chociaż krótkotrwałą, teorję wirów, o której pisze Laplace[1]).

„Kartezjusz usiłował pierwszy sprowadzić do mechaniki ruchy ciał niebieskich. Stworzył on pomysł wirów w subtelnym ośrodku w centrum których umieszczał te ciała; wiry planet pociągały za sobą satelitów, wir słońca pociągał planety, satelitów i ich wiry. Kartezjusz nie był szczęśliwszym w mechanice nieba, niż Ptolomeusz w astronomji, lecz prace ich nie były bez pożytku dla nauki. Ptolomeusz przekazał nam poprzez czternaście wieków ciemnoty, odkryte przez starożytnych prawdy astronomiczne, które sam uzupełnił. W epoce, w której zjawia się Kartezjusz, umysły poruszone sporami religijnemi, odkryciem druku i Nowego Świata — żądne były nowości. Filozof ten zastępując dawne błędy, błędami bardziej pociągającemi, popartemi przez autorytet jego odkryć geometrycznych, zniszczył panowanie Arystotelesa, któregoby nie zachwiała filozofja poważniejsza. Lecz stawiając za zasadę, że zacząć trzeba od wątpienia we wszystko, zachęcił do poddania swojej własnej teorji surowej krytyce i jego system wirów, przyjęty początkowo z entuzjazmem, nie oparł się długo nowym prądom, które zostały mu przeciwstawione".

GALILEUSZ.

(1561 — 1642).

Galileusz, gorący zwolennik i propagator idei kopernikańskiej, jest również jednym z głównych twórców mechaniki nowoczesnej. Stosował on konsekwentnie metodę doświadczalną w swych badaniach nad ruchem ciał, oraz dał ścisły opis różnych rodzajów ruchu, stwa-

[1]) Exposition du Système du Monde", Livre V, chap. V.

rzając tym sposobem podstawy kinematyki. Zajmował się również zagadnieniami hydrostatyki, nawiązując do prac Archimedesa.

Galileo Galilei pochodził ze znakomitej, lecz zubożałej rodziny florenckiej. Urodził się w Pizie jako syn pieworodny Wincentego (Vincenzo) Galileusza, który był człowiekiem wysoce wykształconym, znał literaturę klasyczną i matematykę, posiadał zwłaszcza gruntownie teorję muzyki i sam pięknie grał na lutni. Młody Galileusz od wczesnego dzieciństwa wykazywał różnostronne i wybitne uzdolnienia. Ojciec przeznaczył go początkowo do zawodu handlowego, chcąc mu zapewnić byt materjalny. Oddał go początkowo do szkółki we Florencji, następnie zaś do szkoły klasztornej w Valembroso pod Florencją. Tu zdobył Galileusz znajomość języków starożytnych i literatury klasycznej, oraz logiki i djalektyki. Postępy jego w naukach były tak znakomite, że ojciec zmienił swój zamiar pierwotny i wysłał go do uniwersytetu Pizańskiego na medycynę, która mogła mu również dać pewne korzyści materjalne. Udawszy się w r. 1581 na uniwersytet w Pizie, młody Galileusz zaczął przedewszystkiem uczęszczać na kurs filozofji. Bogata indywidualność jego znalazła widocznie grunt odpowiedni i rozwijała się zadziwiająco różnorodnie: był on zdolnym muzykiem-kompozytorem, obrazy jego znajdywały uznanie u wybitnych malarzy owoczesnych, jego styl wytworny i bogaty wróżył mu świetną karjerę literacką, a wymowa i zdolności towarzyskie zapewniały powodzenie w świecie. Równocześnie myśl jego pracowała poważnie nad zagadnieniami, dotyczącemi filozofji przyrody. W filozofji panował w owym czasie kierunek perypatetyczny, zapoczątkowany przez Arystotelesa, a wypaczony przez niektórych jego następców.

W zastosowaniu do fizyki, zwolennicy kierunku, trzymali się metody dedukcyjnej.

Wychodząc z pewnych założeń lub hipotez, wyjętych z dzieł Arystotelesa, wysnuwali oni drogą sylogizmów pewne wnioski, dotyczące tego, jak zjawiska powinny zachodzić w przyrodzie; wniosków tych jednak nie sprawdzali doświadczalnie. Prócz tego przy wyjaśnianiu zjawisk posługiwali się pojęciem „własności ukrytych". Na zapytanie np., dlaczego magnes przyciąga żelazo, fizyka perypatetyczna dawała mniej więcej następującą odpowiedź: w obecności magnesu substancja żelaza nabiera pewnej własności ukrytej i naturą jej zdolności jest przyciąganie żelaza do magnesu [1]).

[1]) p. Duhem: „Ewolucja mechaniki".

Jałowe te metody nie mogły zadowolić Galileusza; spostrzegawcze jego oko umiało widzieć zjawiska, zaś filozoficzny kierunek jego umysłu kazał mu w zjawiskach doszukiwać się praw nimi rządzących. W 19 roku życia, obserwując w kościele w Pizie wahania lampy, zawieszonej na długim sznurze i mierząc czas wahnięć uderzeniami własnego pulsu, dochodzi on do sformułowania prawa izochronizmu drgań wahadła.

W tym czasie również wykład matematyki opata Ricci, zwraca w tym, dotąd obcym Galileuszowi kierunku, jego zainteresowania. Pod kierunkiem Ricci'ego zapoznaje się Galileusz z geometrją Euklidesa i z dziełami Archimedesa.

Studja te prowadzą go do samodzielnych prac w tej dziedzinie: robi on poprawki w teorji środka ciężkości ciał sztywnych i buduje na podstawie zasady Archimedesa wagę hydrostatyczną (bilancetta). Prace te zwracają na młodego uczonego uwagę Guido'na Ubaldi'ego, i za jego poparciem zostaje on powołany w r. 1589 na katedrę matematyki w Pizie. Wkrótce potem wykonywa on szereg doświadczeń nad spadaniem ciał ciężkich, zrzucając ciała różnej objętości i masy z pochyłej wieży w Pizie[1]) i dochodzi do prawa proporcjonalności pomiędzy czasem a prędkością ciał spadających, oraz do prawa niezależności prędkości ciał przy spadaniu od ich masy. Wyniki badań swoich podawał w wykładach, które cieszyły się niezwykłą frekwencją, wywołały jednak niezadowolenie ze strony zwolenników fizyki perypatetycznej, którzy utrzymywali, że prędkość ciała spadającego jest proporcjonalna do jego masy. Z tego powodu w r. 1592 Galileusz opuszcza Pizę i przenosi się do Padwy, również na katedrę matematyki, gdzie pracuje aż do roku 1610, otoczony przyjaciółmi, między którymi znajdują się Salviati i Sagredo (późniejszy doża wenecki), których Galileusz uwiecznił w swych dialogach. Na ten okres przypada wynalazek termometru powietrznego.

Termometr ten (rys. 14) składał się ze szklanej kuli z przylutowaną doń długą wązką rurką. Po ogrzaniu kuli, kiedy część powietrza została z niej wyparta, koniec rurki zanurzony był w naczyniu z wodą. Powietrze, oziębiając się, kurczyło się, i woda z naczynia podnosiła się w rurce. Wysokość poziomu wody w rurce mierzyła przeto temperaturę powietrza otaczającego. Termometr taki był, niestety, również wrażliwy na zmiany ciśnienia atmosferycznego.

---

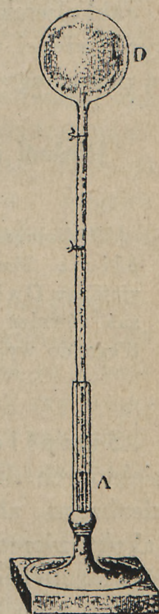
[1]) Podobne doświadczenia wykonywał już przed nim Leonardo da Vinci (p. str. 26).

W tym też czasie Galileusz zbudował teleskop, który dawał trzydziestokrotne powiększenie.

Na myśl tego teleskopu, składającego się z soczewki płasko - wypukłej i płasko - wklęsłej, naprowadziły go pewne rozważania teoretyczne; pobudką do nich był wynalazek lunety, składającej się z dwóch soczewek wypukłych, wynalazek przypadkowo dokonany przez Holendra Jakóba Metzius'a.

Prawo spadku ciał w kierunku pionowym, po równi pochyłej, jak również prawa spadku ciał rzuconych, prawa wahadła oraz ogólne prawa ruchu jednostajnego i jednostajnie przyśpieszonego podaje Galileusz w ulubionej przez siebie formie dialogów w dziele „Discorsi e dimonstrazioni matematiche intorno a due nuove scienze", wydanem w Leydzie w r. 1638.

Odkrycie teleskopu zwróciło wzrok i myśl Galileusza ku zjawiskom, zachodzącym na niebie. Galileusz pierwszy zastosował teleskop do badania zjawisk niebieskich. Obserwowanie zjawisk tych przekonywa dowodnie Galileusza o prawdziwości teorji kopernikańskiej układu świata i dostarcza teorji nowych dowodów. (Odkrycie księżyców Jowisza). Odtąd Galileusz występuje jako gorący zwolennik i propagator idei kopernikańskiej. Sprawie tej poświęca niemal wyłącznie swą pracę i swój talent dialektyczny.



Rys. 14.
Termometr Galileusza

W r. 1632 wydaje dzieło „Dialogo intorno ai due massimi sistemi del mondi", w którem w formie dialogów przeciwstawia system Kopernika systemowi Ptolomeusza.

Poglądy Galileusza miały zwolenników pomiędzy wyższem duchowieństwem w Rzymie; lecz przez kongregację indeksu uznane zostały za sprzeczne z literą Pisma Świętego.

Sędziwy już wówczas Galileusz wtrącony został do więzienia i następnie zmuszony w r. 1633 do odwołania swojej nauki. Podanie głosi, iż miał on po akcie odwołania wykrzyknąć: „E pur si muove" (A jednak się porusza), zdaje się jednak, że w rzeczywistości fakt ten nie miał miejsca. Więzienie zostało mu następnie zamienione na przymusowe zamieszkiwanie willi arcybiskupa Sienny Piccolomini'ego, gdzie podlegał dość ścisłemu dozorowi; nie wolno mu było,

między innemi, zajmować się astronomją. Wreszcie pozwolonem mu było zamieszkać w Arcetri.

Tu opracował on swe dialogi, dotyczące mechaniki. Tu również pracowali z nim przez czas pewien jego uczniowie Torricelli i Viviani, któremu zawdzięczamy biografję Galileusza. W ostatnich latach życia sędziwy uczony traci wzrok i umiera wreszcie w cztery lata później, zgnębiony przeciwnościami życia.

Jakkolwiek dzieła astronomiczne Galileusza dały mu za jego życia więcej rozgłosu, to jednak dla nauki istotniejsze znaczenie mają prace jego w dziedzinie mechaniki.

Dialogi i dowody matematyczne, dotyczące dwu nowych gałęzi wiedzy[1]).

W dialogach tych biorą udział trzej uczeni: Salviati, Sagredo i Simplicio. Simplicio jest przedstawicielem fizyki perypatetycznej. W usta Salviati'ego Galileusz wkłada swoje własne teorje fizyczne i poglądy, Sagredo zaś, również zwolennik „nowej fizyki", stawia zapytania, pobudzające Salviati'ego do wyjaśnień.

DZIEŃ PIERWSZY.

„Simplicio. Arystoteles zwalcza, o ile pamiętam, mniemanie niektórych dawniejszych filozofów, którzy wprowadzali próżnię jako niezbędną, aby ruch mógł dojść do skutku, gdyż bez niej ruch jest jakoby niemożliwy. W przeciwieństwie do tego dowodzi Arystoteles, iż właśnie zjawisko ruchu zaprzecza przypuszczeniu istnienia próżni; dowód jego jest następujący. Rozpatruje on dwa przypadki: przypuszcza, po pierwsze, że różne masy poruszają się w tym samym ośrodku; następnie zaś, że jedna i ta sama masa porusza się w ośrodkach różnych. W pierwszym przypadku twierdzi on, że ciała różne poruszają się w tym samym ośrodku z prędkością różną, proporcjonalną do ich ciężarów, tak że np. ciężar 10 razy większy będzie się poruszał 10 razy prędzej. W drugim przypadku przyjmuje on, że prędkości jednej i tej samej masy w ośrodkach różnych mają się do siebie odwrotnie jak gęstości, tak że np., gdyby gęstość wody była 10 razy większa, niż gęstość powietrza, prędkość w powietrzu byłaby 10 razy większa, niż w wodzie. Drugiego twierdzenia dowodzi on

---

[1]) Wyjątki z dzieła: „Discorsi e dimonstrazioni matematiche intorno a due nuove scienze". Leyda, 1638.

Przekład niniejszy dokonany został z niemieckiego tłumaczenia A. v. Oettingen'a, wydanego w tomikach 11, 24 i 25 wydawnictwa „Ostwald's Klassiker".

w sposób następujący. Ponieważ gęstość próżni różni się nieskończenie mało od gęstości materji, napełniającej przestrzeń w najwyższym stanie rozrzedzenia, to ciało, które w ośrodku wypełniającym przestrzeń w pewnym czasie przechodzi pewną przestrzeń, w próżni posuwa się momentalnie; lecz ruch momentalny jest niemożliwością; niemożliwością więc jest wskutek tego tworzenie się próżni.

Salviati. ...Wątpię bardzo, czy Arystoteles sprawdził kiedy przez doświadczenie, czy dwa kamienie, z których jeden waży 10 razy więcej, niż drugi, będąc puszczone w tym samym momencie z wysokości 100 łokci, tak różnią się w swoim ruchu, że w chwili przybycia większego, mniejszy przebyłby zaledwie 10 łokci.

Simplicio. Z mowy Waszej widać, że rzecz tę sprawdzaliście eksperymentalnie, gdyż inaczej nie mówilibyście o doświadczeniach.

Sagredo. Ja zaś, panie Simplicio, nie wykonawszy żadnego doświadczenia, zapewniam Was, że kula armatnia stu-, dwusto- i więcej funtowa nie dosięgnie ziemi ani o cal przed kulą, ważącą pół funta, jeśli obie spadają z wysokości 200 łokci.

Salviati. Bez wielu doświadczeń możemy dowieść przy pomocy krótkiego prostego wnioskowania, iż jest niemożliwością, aby większy ciężar poruszał się prędzej niż mniejszy, jeśli oba są z tego samego materjału. Powiedźcie mi bowiem, panie Simplicio, czy uznajecie, iż każde ciało spadające posiada z natury właściwą mu prędkość, tak iż, aby ją zwiększyć lub zmniejszyć, trzeba zastosować siłę lub opór?

Simplicio. Niewątpliwie ciało w pewnym danym ośrodku posiada określoną prędkość, która może być zwiększona tylko przez nową podnietę lub zmniejszona — przez nową przeszkodę.

Salviati. Jeśli mamy dwa ciała, których prędkości są różne, to jasnem jest, iż gdy połączymy powolniejsze z szybszem, to ostatnie musiałoby być opóźnione przez tamto, tamto zaś, powolniejsze, musiałoby być przez szybsze przyśpieszone. Czy zgadzacie się na to?

Simplicio. Wniosek ten wydaje mi się zupełnie prawidłowym.

Salviati. A jeśli to jest prawdą i jeśliby prawdą było, że duży kamień porusza się np. z prędkością 8-u łokci, mniejszy zaś 4-ch łokci, to oba połączone musiałyby mieć prędkość mniejszą niż 8 łokci. Lecz wszak oba kamienie razem większe są, niż tamten większy kamień, który posiadał prędkość 8-u łokci; a więc poruszałby się wolniej niż mniejszy, co przeczyłoby Waszemu założeniu. Widzicie więc, że na podstawie przypuszczenia, że większe ciało posiada większą

prędkość niż mniejsze, mogę doprowadzić Was do wniosku, że większe ciało porusza się wolniej niż mniejsze.

Salviati. Doświadczenia z dwoma ciałami możliwie różnej wagi, którym pozwalamy swobodnie spadać, aby obserwować, czy osiągają one tę samą prędkość, — przedstawiają pewne trudności, gdyż przy wielkiej wysokości ośrodek, który musi być stale rozcinany i odsuwany na stronę, wywiera większy wpływ na ciało bardzo lekkie, niż na gwałtowny pęd bardzo ciężkiego ciała, i ciało bardzo lekkie pozostanie w tyle; przy nieznacznej wysokości, możnaby powątpiewać, czy różnica istnieje, gdyż zaledwie da się ona spostrzec. Z tego względu zastanawiałem się nad tem, czy nie możnaby było spadania z nieznacznej wysokości powtórzyć kilkakrotnie, tak jednak, aby nastąpiło zsumowanie tych małych różnic czasu pomiędzy przybyciem ciała cięższego i lżejszego, przez to w zjawisku wystąpiłaby różnica łatwo nawet dostrzegalna. Aby również badać ruchy powolniejsze, przy których praca oporu, zmierzająca do zmniejszenia działania ciężkości — jest mniejsza, puszczałem ciała wzdłuż równi bardzo słabo pochylonej, gdyż na niej, zarówno jak i przy spadaniu swobodnem, może być obserwowane to, co się odnosi do ciał różnego ciężaru; prócz tego umyśliłem uwolnić się od oporu, który może wynikać z zetknięcia się z płaszczyzną pochyłą; wziąłem ostatecznie dwie kule: jedną z ołowiu, drugą z korka, pierwszą około 100 razy cięższą niż drugą, umocowałem i zawiesiłem na dwóch równych cienkich nitkach długości 4 do 5 łokci; gdy wyprowadziłem obie kule z pozycji pionowej i wypuściłem je jednocześnie, opisywały one części kół o równych promieniach; kule wychylały się poza pion, powracały po tej samej drodze i po przejściu ze sto razy tam i z powrotem pokazało się wyraźnie, iż ciało cięższe tak dokładnie zgadzało się z ciałem lżejszem, że zarówno przy 100, jak i przy 1000 drgań, nie dała się zauważyć najmniejsza różnica; poruszały się one zupełnie jednakowym krokiem. Daje się coprawda zauważyć wpływ ośrodka, który przeciwstawia ruchowi opór i zmniejsza o wiele znaczniej wahnięcia kuli korkowej, niż kuli ołowianej, lecz wahnięcia te nie stają się wskutek tego bardziej lub mniej częste; nawet wtedy, gdy łuki, zakreślane przez kulę korkową, wynoszą tylko 5 lub 6 stopni, zaś łuki, zakreślane przez kulę ołowianą, 50 lub 60 stopni, są one zakreślane stale w jednym i tym samym czasie...

[Prawo izochronizmu drgań wahadła brzmi, jak następuje: częstość drgań danego wahadła jest wielkością stałą, niezależną od obszerności drgań, czyli od amplitudy. Prawo to sprawdza się jednak tylko dla nieznacznych wychyleń

(dla których wstawa kąta wychylenia może być zastąpiona przez kąt, wyrażony w mierze łukowej). Galileusz popełnia tu błąd, stosując prawo to również do wychyleń znacznych].

Przy wahadłach różnej długości stosunek czasów [okresów drgania] równy jest stosunkowi pierwiastków kwadratowych z długości, czyli innemi słowy długości wahadeł mają się do siebie, jak kwadraty czasów wahnięcia: jeśli więc wahadło ma poruszać się dwa razy wolniej, niż inne, powinno ono mieć cztery razy większą długość. Inne wahadło będzie miało w porównaniu z krótszem trzy razy dłuższy okres wahania, jeśli długość jego jest dziewięćkroć większa. Z tego wynika również, iż długości wahadeł mają się do siebie odwrotnie, jak kwadraty ilości wahnięć.

Sagredo. Jeśli dobrze zrozumiałem, to mógłbym natychmiast obliczyć długość wahadła ogromnych rozmiarów, nawet gdyby punkt zawieszenia był niewidoczny i można było obserwować tylko dolny koniec. Potrzebowałbym tylko zawiesić ciężar i wprawić go w ruch wahadłowy, i podczas gdy pomocnik liczyłby jego wahnięcia, ja obserwowałbym, w ciągu tego samego czasu, ilość wahnięć innego wahadła o długości równej dokładnie jednemu łokciowi. Z ilości drgań obu wahadeł, przypadających na ten sam okres czasu, obliczam długość mego wahadła; niech np. ilość wahnięć, naliczona przez mego pomocnika, będzie równa 20 w tym czasie, kiedy ja otrzymałem 240; jeśli utworzymy kwadraty 400 i 57600, to otrzymamy, iż długie wahadło zawiera 57600 takich części, których 400 idzie na jeden łokieć; jeśli podzielimy 57600 przez 400, to dostaniemy 144, czyli, że wahadło powinno mieć długości 144 łokcie.

Salviati. Nie będziecie mieli ani cala błędu, zwłaszcza jeśli weźmiecie dużą ilość wahnięć.

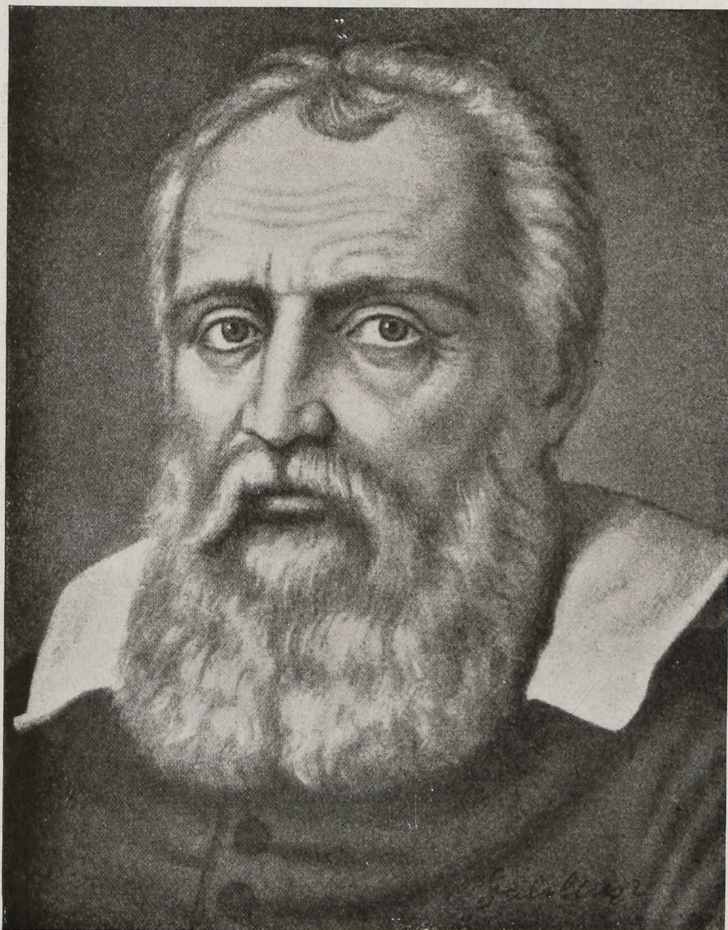
Sagredo. Jakżeż często dajecie mi sposobność do podziwiania bogactwa, a zarazem szczodrobliwości natury, wypowiadając w stosunku do rzeczy prostych, niemal trywjalnych, uwagi tak uderzające, całkowicie nowe i tak dalekie od naszych wyobrażeń. Chyba tysiące razy obserwowałem wahania, np. wahania lamp, wiszących w kościołach na długich sznurach, lecz znalazłem tylko, że pogląd, według którego podobne ruchy są podtrzymywane przez ośrodek otaczający, jak w tym wypadku — powietrze, jest nieprawdopodobny: wydaje mi się, że powietrze musiałoby mieć sąd określony i zarazem mało innych czynności do spełnienia, aby wypełniać godziny huśtaniem wahadła tam i z powrotem z wielką dokładnością. Nigdybym jednak nie odkrył, że to samo ciało, zawieszone na nitce długości

100 łokci, zawsze używa tego samego czasu, niezależnie od tego, czy jest ono odchylone o 90° czy też o 1° — i ciągle wydaje mi się to rzeczą niemożliwą...

S a l v i a t i. Każde wahadło posiada tak stały i określony okres wahania, iż w żaden sposób niepodobna go zmusić do wahań o innym okresie, niż ten, który mu jest z natury właściwy. Weźmy do ręki dowolne wahadło i spróbujmy zwiększyć lub zmniejszyć ilość jego wahnięć; będzie to daremny trud; lecz nawet najcięższemu wahadłu, znajdującemu się w spoczynku, możemy przez samo dmuchanie nadać ruch i nawet dość znaczny, jeśli będziemy dmuchać w okresach wahadłu właściwych; jeśli nawet przy pierwszem dmuchnięciu wyprowadziliśmy wahadło z pozycji równowagi o jeden cal zaledwie, to dmuchnąwszy znowu za jego powrotem, ruch wzmożemy i tak dalej, — jednak tylko dmuchając w określonym czasie i nie wtedy, gdy wahadło ku nam się zbliża (gdyż w tym wypadku zahamowalibyśmy ruch zamiast go wzmóc); wreszcie zostaną wywołane tak silne wahania, iż potrzebaby o wiele większej siły, niż siła jednorazowego dmuchnięcia, aby znowu przywrócić stan spoczynku.

S a g r e d o. Dzieckiem jeszcze będąc widywałem, jak jeden człowiek przez uderzenia, nadawane we właściwym czasie, doprowadził do dźwięczenia olbrzymi dzwon kościelny, aby go zaś zatrzymać, uwieszało się na nim 4 do 5 innych ludzi, którzy jednak wszyscy razem byli kilkakrotnie podnoszeni do góry i nie mogli natychmiast zatrzymać dzwonu, który był wprawiony w ruch przez jednego człowieka, uderzającego w prawidłowych odstępach.

S a l v i a t i. Jest to przykład, który może mi posłużyć znakomicie do wyjaśnienia zadziwiającego zjawiska, dotyczącego oddźwięku strun cytry lub cymbałów, współdźwięczą bowiem nietylko te, które są nastrojone jednakowo, lecz również te, które znajdują się względem nich w stosunku oktawy lub kwinty. Struna uderzona zaczyna dźwięczeć i dźwięczy, dopóki drgania jej trwają: drgania te wprawiają powietrze we współdrgania, które rozchodzą się daleko i pobudzają wszystkie struny tego instrumentu, jak również innych, sąsiednich: każda struna nastrojona jednakowo ze struną uderzoną, będąc skłonną do drgania w tem samem tempie, przy pierwszym impulsie zaczyna się trochę poruszać; do niego dodaje się drugi, trzeci, dwudziesty i więcej, i wszystkie one działają w odpowiednim czasie tak, że ostatecznie drgania struny stają się równie znaczne, jak drgania pierwszej struny; amplitudy ich rosną, dopóki nie osiągną amplitudy drgań pobudzających. Fale powietrzne wstrząsają nietylko



GALILEUSZ

Wyd. „Mathesis Polska".



struny, lecz również inne ciała zdolne do współdrgania... Jeśli potrzemy smyczkiem grubą strunę skrzypiec, trzymając w pobliżu instrumentu kieliszek z cienkiego czystego szkła, zostanie on wprawiony w drgania, jeśli ma miejsce zgodność okresów drgań, i będzie głośno współdźwięczeć. Jak drgania otaczającego powietrze oddawane są ciału współdźwięczącemu, można widzieć w następujący sposób: kieliszek, w którym znajduje się woda, doprowadzamy do dźwięczenia, pocierając brzeg jego końcem palca; rozpoznajemy natychmiast fale wodne prawidłowych kształtów; doświadczenie udaje się jeszcze lepiej, jeśli podstawę kieliszka umieścimy na dnie dużego naczynia, napełnionego wodą niemal po brzegi kieliszka; spostrzegamy natychmiast, że woda zostaje wprawiona w drgania nader prawidłowe, które oddalają się od kieliszka z wielką szybkością. Przy dostatecznie dużym kieliszku pełnym wody, widywałem często fale kształtów nader prawidłowych; później jednak ton przeskakiwał o oktawę wyżej i fala wodna rozpadała się na dwie fale: zjawisko to wykazuje wyraźnie, iż kształt oktawy jest podwójny.

S a g r e d o... Trojakim sposobem możemy podnieść wysokość tonu struny: przez skrócenie jej, przez napięcie i przez podparcie. Przy niezmienionem napięciu i innych właściwościach wywołujemy oktawę przez skrócenie o połowę, to znaczy, że uderzamy początkowo całą strunę, następnie połowę jej. Przy niezmienionej długości i innych własnościach otrzymujemy oktawę przez napięcie, nie wystarczy po temu jednak siła podwójna, lecz poczwórna; jeśli była ona początkowo napięta siłą jednego funta, to potrzebujemy czterech funtów, aby otrzymać oktawę. Wreszcie przy niezmienionej długości i napięciu, grubość należy zmniejszyć poczwórnie, aby otrzymać oktawę...

S a l v i a t i. Jest to piękne doświadczenie, które pozwala rozróżniać poszczególne drgania ciała; są to te same drgania, które rozchodzą się w powietrzu i wstrząsają naszą błonę bębenkową i które w duszy naszej stają się tonem.

O ruchu miejscowym (lokalnym).

[W fizyce perypatetycznej pojęcie ruchu było szersze, niż w fizyce dzisiejszej; oznaczało ono wszelkiego rodzaju zmiany. Przez „ruch miejscowy czyli lokalny" oznaczano zmianę miejsca, czyli ruch w ściślejszem tego słowa znaczeniu. G a l i l e u s z w wykładzie swoim zapożycza jeszcze pewne określenia od fizyki perypatetycznej; ruchy dzieli np. na naturalne i narzucone].

O przedmiocie bardzo starym rozpoczynamy naukę całkowicie nową. Niema w przyrodzie nic starszego nad ruch i pisma filozofów

o nim są liczne i obszerne. Jednak poznałem wiele właściwości jego, w których liczbie znajdują się niektóre nadzwyczaj godne poznania. O kilku łatwiejszych z pomiędzy tych twierdzeń często się słyszy; tak np., że ruch naturalny spadających ciał ciężkich jest przyśpieszony. Dotąd jednak nie zostało jeszcze wypowiedzianem, jakim jest stopień tego przyśpieszenia, gdyż, o ile wiem, nikt nie dowiódł, iż drogi przebywane przez ciało spadające w czasach równych, mają się do siebie jak liczby nieparzyste.

[Ze wzoru na ruch jednostajnie przyśpieszony

$s = {}^1/_2 \gamma t^2$

wynika: $s_1 = {}^1/_2 \gamma$ (s_1 — droga przebyta w ciągu pierwszej sekundy)

$s_2 = 2\gamma$ (s_2 — droga przebyta w ciągu 2-ch pierwszych sekund)

a więc: $s_2' = s_2 - s_1 = (2 - {}^1/_2)\gamma = {}^3/_2 \gamma$ (s_2' — droga przebyta w ciągu drugiej sekundy)

$s_3 = {}^9/_2 \gamma$ (s_3 — droga przebyta w ciągu trzech pierwszych sekund)

$s_3' = s_3 - s_2 = ({}^9/_2 - {}^4/_2)\gamma = {}^5/_2 \gamma$ (s_3' — droga przebyta w ciągu trzeciej sekundy)

$s_4 = {}^{16}/_2 \gamma$

$s_4' = s_4 - s_3 = ({}^{16}/_2 - {}^9/_2)\gamma = {}^7/_2 \gamma$

Mamy stąd:

$s_1' : s_2' : s_3' : s_4' \ldots = {}^1/_2 : {}^3/_2 : {}^5/_2 : {}^7/_2 \ldots = 1 : 3 : 5 : 7 \ldots$]

Spostrzeżono, że pociski zakreślają pewną krzywą, nikt jednak nie głosił, iż ta krzywa jest parabolą.

Chcę tu udowodnić prawdziwości tego, jakoteż wielu innych rzeczy. niemniej godnych poznania; utoruję też drogę do tego, co pozostaje jeszcze do zrobienia. W ten sposób będzie stworzona nader rozległa i niezmiernie ważna nauka, której początek ma stanowić praca niniejsza; w głębsze jej tajniki niech przenikną duchy, wyższe odemnie.

Rozprawa nasza dzieli się na trzy części. W pierwszej części rozpatrujemy ruch jednostajny. W drugiej opisujemy ruch jednostajnie przyśpieszony. W trzeciej zajmujemy się ruchem narzuconym czyli ruchem pocisków.

O ruchu jednostajnym.

Ruch jednostajny musimy przedewszystkiem opisać.

Określenie.

Jednostajnym nazywamy ruch taki, przy którym drogi, przebywane przez ciało w jakichkolwiek czasach równych, są sobie równe.

Wyjaśnienie.

Do dawnej definicji (która mówiła poprostu o równych drogach w czasach równych) dodaliśmy wyraz „w jakichkolwiek", to jest w dowolnych czasach równych: gdyż jest możliwem, by ciało przechodziło w pewnych okresach czasu drogi równe, natomiast w mniejszych częściach tych okresów — drogi nierówne...

[W dalszym ciągu Galileusz dowodzi sześciu twierdzeń, dotyczących ruchu jednostajnego, które analitycznie dają się streścić w równaniach następujących:

1) $s_1 = vt_1$, $s_2 = vt_2$ $\qquad \frac{s_1}{s_2} = \frac{t_1}{t_2}$

2) $s_1 = v_1 t$, $s_2 = v_2 t$ $\qquad \frac{s_1}{s_2} = \frac{v_1}{v^2}$

3) $s = v_1 t_1$, $s = v_2 t_2$ $\qquad v_1 t_1 = v_2 t_2 \qquad \frac{v_1}{v_2} = \frac{t_1}{t_2}$

4) $s_1 = v_1 t_1$, $s_2 = v_2 t_2$ $\qquad \frac{s_1}{s_2} = \frac{v_1 t_1}{v_2 t_2}$

5) $s_1 = v_1 t_1$, $s_2 = v_2 t_2$ $\qquad \frac{t_1}{t_2} = \frac{s_1}{s_2} \cdot \frac{v_2}{v_1}$

6) $s_1 = v_1 t_1$, $s_2 = v_2 t_2$ $\qquad \frac{v_1}{v_2} = \frac{s_1}{s_2} \cdot \frac{t_2}{t_1}$]

O ruchu naturalnie przyśpieszonym.

Dotąd rozpatrywaliśmy ruch jednostajny; teraz przechodzimy do ruchu przyśpieszonego. Najpierw musimy znaleźć i wyjaśnić definicję, dokładnie odpowiadającą zjawisku naturalnemu. Byłoby rzeczą zupełnie dozwoloną dowolnie wymyślić jakikolwiek rodzaj ruchu i rozpatrywać wypływające stąd zjawiska. (Tak np. ktoś, ktoby pomyślał sobie, że linje śrubowe lub konchoidy powstają z pewnych ruchów, chociażby te nawet nie były spotykane w naturze, mógłby pomimo to z założeń swych wywnioskować o ich głównych własnościach).

Zdecydowaliśmy się jednak rozpatrywać te zjawiska, które zachodzą w przyrodzie przy swobodnem spadaniu ciał i określenie ruchu przyśpieszonego dostosowujemy do istoty ruchu naturalnie przyśpieszonego. Po długich rozważaniach wydało się nam ostatecznie, iż tak będzie najlepiej, głównie z tej racji, iż to, co doświadczenie ukazuje zmysłom, odpowiada właśnie rozpatrywanym zjawiskom. Wreszcie do rozpatrywania ruchu jednostajnie przyśpieszonego doprowadziła nas uważna obserwacja zjawisk codziennych i porządku natury w jej wszystkich urządzeniach. Natura bowiem we wszelkich swych działa-

niach, przy wykonywaniu ich, używa najpierwszych, najprostszych i najłatwiejszych środków; gdyż, jak sądzę, nikt chyba nie myśli, iż latanie lub pływanie prościej lub łatwiej mogłoby być dokonywane, niż przy pomocy tych środków, których używają ptaki lub ryby przez instynkt naturalny.

[Podobną myśl znajdujemy u Kopernika (p. str. 35) i u Newtona (I. prawidło badania przyrody, p. str. 91)].

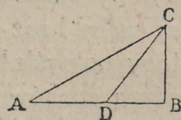
Jeśli więc spostrzegam, że kamień, wytrącony z równowagi, spada ze znacznej wysokości i nabiera coraz nowych przyrostów prędkości, to czemuż nie miałbym mniemać, iż przyrosty takie są najprostsze i dochodzą do skutku w sposób najłatwiej dla każdego z nas zrozumiały. Po dokładniejszem zastanowieniu się żaden przyrost nie wyda się nam równie prostym, jak ten, który dodaje się zawsze w ten sam sposób... Ruch równomiernie czyli jednostajnie przyśpieszony jest to ruch taki, przy którym w czasach równych przybywają równe momenty prędkości...

[Równia pochyła] [1]).

Galileusz czyni założenie następujące:

Prędkości, które osiąga to samo ciało przy różnych pochyleniach równi, są sobie równe, jeśli wysokości tych równi są równe.

Wysokością równi pochyłej nazywamy pion, który może być spuszczony z najwyższego punktu równi na płaszczyznę poziomą, która przechodzi przez najniższe punkty równi. Jeśli więc *BA* jest równoległa do horyzontu (rys. 15) ponad którym pochylone są równie *CA* i *CD*, to pion *CB*, prostopadły do poziomej *BA* nazywa się wysokością obu równi *CA* i *CD*. Przyjmuję, że ciało, poruszające się wdłuż *CA* lub *CD*, przybywając do *A* lub *D* ma prędkości równe, gdyż mają one tę samą wysokość *CB*. I prędkość jest ta sama, jaką ciało osiągałoby przy swobodnym spadku z *C* do *B*.



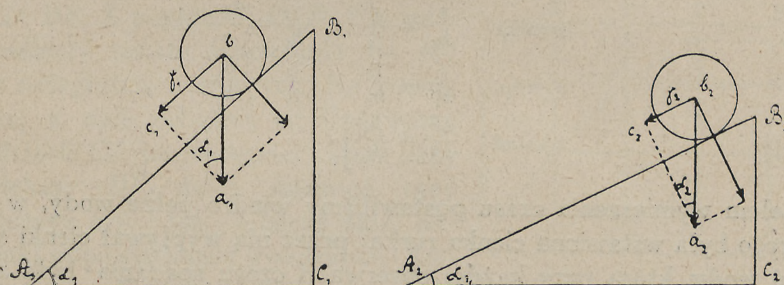
Rys. 15.

Dla sprawdzenia założenia powyższego Galileusz wykonywa doświadczenie z równią pochyłą; poniżej podajemy opis tego doświadczenia:

Na linji, lub powiedzmy na drewnianej desce na 12 łokci długiej, pół łokcia szerokiej i trzy cale grubej, została na jej wąskiej stronie

[1]) Porówn. z teorją równi Stevina.

wydrążona rynna, nieco więcej niż na jeden cal szeroka. Została ona przeprowadzona bardzo prosto, i celem otrzymania powierzchni bardzo gładkiej, wyklejona została wewnątrz nader gładkim i czystym pergaminem; po tej rynnie puszczana była bardzo twarda, dokładnie okrągła i gładko wypolerowana kula mosiężna. Po ustawieniu deski jeden koniec jej był podniesiony na wysokość jednego, to znów na wysokość dwóch łokci; wtedy puszczano po tej rynnie kulę i przy pomocy poniżej podanego sposobu określano czas spadania na przestrzeni całej tej drogi. Poszczególne doświadczenia powtarzaliśmy często, celem dokładniejszego określenia czasu, i nie znajdowaliśmy



Rys 16.

żadnych różnic, nawet takich, któreby wynosiły chociaż dziesiątą część uderzenia pulsu. Następnie puszczaliśmy kulę już tylko na czwartej części tej drogi i znajdowaliśmy dokładnie połowę tego czasu spadania, co przedtem. Później braliśmy inne drogi i porównywaliśmy zmierzony przedtem czas spadania z ostatnio otrzymanym i z czasem, odpowiadającym $^2/_3$, $^3/_4$, lub jakimś innym ułamkom [czasu, przyjętego za jednostkę]. Przy stokrotnem chyba powtarzaniu znajdowaliśmy stale, iż drogi miały się do siebie, jak kwadraty czasów, i to dla każdego nachylenia równi, t. j. kanału, w którym biegła kula. Znaleźliśmy prócz tego, iż czasy spadania, zaobserwowane przy różnych pochyleniach równi, są do siebie dokładnie w tym stosunku, jak to jest podane i dowiedzione poniżej.

[„Czasy spadania po równiach jednakowej długości, pochylonych niejednakowo, mają się do siebie odwrotnie, jak pierwiastki kwadratowe z wysokości".

Oznaczmy $A_1B_1=A_2B_2=S$ (rys. 16)

$B_1C_1=h_1 \quad B_2C_2=h_2$

Przyśpieszenie na równi I $\gamma_1=b_1c_1$

" " " II $\gamma_2=b_2c_2$

Czas spadania na równi I t_1
" " " " II t_2
Przyśpieszenie przy swobodnem spadaniu ciał $g = a_1 b_1 = a_2 b_2$
Ze wzorów na drogę w ruchu jednostajnie przyśpieszonym wynika

$$s = \frac{1}{2}\gamma_1 t_1^2$$
$$s = \frac{1}{2}\gamma_2 t_2^2$$

stąd
$$\gamma_1 t_1^2 = \gamma_2 t_2^2$$
$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{t_2^2}{t_1^2}$$

Z podobieństwa trójkątów $\triangle A_1B_1C_1 \sim \triangle a_1b_1c_1$

wynika $\frac{s}{h_1} = \frac{g}{\gamma_1}$ $\frac{\gamma_1}{h_1} = \frac{g}{s}$

Z podobieństwa trójkątów $\triangle A_2B_2C_2 \sim \triangle a_2b_2c_2$

wynika $\frac{s}{h_2} = \frac{g}{\gamma_2}$ $\frac{\gamma_2}{h_2} = \frac{g}{s}$

a więc $\frac{\gamma_1}{h_1} = \frac{\gamma_2}{h_2}$ $\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{h_1}{h_2}$

a stąd $\left.\frac{t_2^2}{t_1^2} = \frac{h_1}{h_2}\right]$.

Celem wymierzenia czasu postawiliśmy wiadro pełne wody, w dnie którego była wstawiona cienka rurka; przez nią wypływał cienki strumień wody, która przy każdej obserwacji czasu spadania była zbieraną do małego kubka: woda zebrana w ten sposób była ważona na bardzo dokładnej wadze; z różnicy ważeń otrzymywaliśmy stosunki ciężarów i czasów.

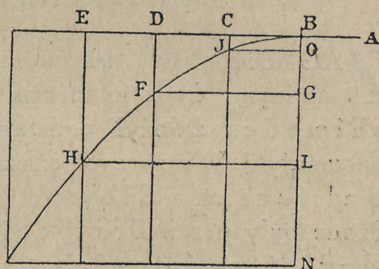
O ruchu pocisków (projectio).

Dotąd rozpatrywaliśmy ruch jednostajny i ruch naturalnie przyśpieszony wzdłuż płaszczyzn pochyłych. Poniżej pozwolę sobie wyłożyć pewne zjawiska oraz pewne godne poznania twierdzenia, wraz ze ścisłemi dowodami, dotyczącymi ciał posuwających się ruchem złożonym, mianowicie złożonym z ruchu jednostajnego i naturalnie przyśpieszonego; takim bowiem jest ruch pocisków i można sobie wyobrazić, że tak powstaje. Jeśli ciało, nie doznając żadnego oporu, porusza się poziomo, to ze wszystkich poprzednich szczegółowych wywodów wynika, iż ruch ten jest jednostajny i trwa bez końca na płaszczyźnie nieskończonej; jeśli zaś ona jest ograniczona i ciało jest ciężkie, to będzie ono po przybyciu do jej kresu poruszać się dalej, i do jego ruchu jednostajnego niezniszczalnego, dołączy się ruch, wywołany przez ciężkość, tak iż powstanie ruch złożony, który nazywam ruchem pocisków. Składa się on z ruchu jednostajnego poziomego i z ruchu jednostajnie przyśpieszonego. Na ten temat podamy kilka rozwiązań.

TWIERDZENIE I. Teza I. Ciało poddane ruchowi jednostajnemu poziomemu i równocześnie ruchowi jednostajnie przyśpieszonemu zakreśla połowę paraboli.

Tu następuje ustęp, w którym autor w formie dialogu przypomina czytelnikowi własności paraboli.

Wyobraźmy sobie prostą lub płaszczyznę poziomą *AB* (rys. 17), wzdłuż której ciało porusza się jednostajnie. Przy końcu jej braknie podpory i ciało wskutek swego ciężaru ulega ruchowi wzdłuż prostej *BN*. Wyobraźmy sobie *AB* przedłużone w kierunku do *E* i podzielmy to przedłużenie na odcinki równe *BC*, *CD*, *DE*. Z punktu *B*, *C*, *D*, *E* poprowadzimy proste równoległe do *BN* w odległościach równych. Na pierwszej z nich odłóżmy od *C* dowolny odcinek *CJ*, na następnej cztery razy większy *DF*, dalej dziewięć razy dłuższy *EH*, i tak — coraz dalej odcinki odpowiadające kwadratom. Kiedy ciało z *B* dochodzi jednostajnie do *C*, to wyobrażamy sobie dodany kawałek *CJ*, spowodowany przez spadanie; ciało po czasie *BC* znajdzie się w punkcie *J*. Dalej w czasie *DB* równym 2*BC* droga spadku wyniosłaby 4*CJ*, gdyż w poprzedniej rozprawie zostało dowiedzionem, iż drogi przebieżone ruchem jednostajnie przyśpieszonym, mają się do siebie, jak kwadraty czasów. Podobnie droga *EH*, przebieżona w czasie *BE*. równą będzie 9*CJ*, gdyż odcinki *EH*, *DF*, *CJ* mają się do siebie jak kwadraty odcinków *EB*, *DB*, *CB*. Jeśli z punktu *J*, *F*, *H* poprowadzimy proste *JO*, *FG*, *HL* równolegle do *EB*, to *HL*, *FG*, *JO* równe będą odcinkom *EB*, *DB*, *CB*, jak również *BO*, *BG*, *BL* — równe odcinkom *CJ*, *DF*, *EH*. Kwadraty *HL* i *FG* mają się do siebie jak odcinki *LB*, *BG* i kwadraty *FG*, *JO* jak *GB*, *BO*. A więc punkty *J*, *F*, *H* leżą na połowie paraboli. Podobnie, przyjmując dowolne inne drogi i odpowiadające im czasy, moglibyśmy udowodnić, iż punkty określone w podobny sposób, będą leżały stale na tej samej paraboli, przez co twierdzenie jest udowodnione.



Rys. 17.
Krzywa przy rzucie poziomym.

Rozdział III.

DYNAMICZNE WŁASNOŚCI MATERJI.

ZAGADNIENIE własności cieczy i gazów znane już było starożytnym: kwestja próżni zajmowała Arystotelesa, Archimedes założył podstawy hydrostatyki, Heron był twórcą pneumatyki. W nowszych czasach zagadnienia te zostały podjęte przez Galileusza i Stevina. Dalsze prace w tej dziedzinie prowadzone były przez Torricelli'ego, Pascal'a, Guericke'go, Mariotte'a i Boyle'a.

TORRICELLI.

(1608 — 1647).

Ewangelista Torricelli urodził się w Fajencji w r. 1608. W wieku lat 20 przybył do Rzymu, gdzie studjował matematykę pod kierunkiem Castelli'ego, byłego towarzysza prac Galileusza. W r. 1641 Torricelli udaje się do Arcetri, dokąd skierowuje go Castelli, aby ociemniałemu już podówczas Galileuszowi pomagał w jego pracy naukowej i spisywał ostatnie myśli sędziwego mistrza, wespół z drugim jego uczniem, Vivianim. Po śmierci Galileusza objął Torricelli jego stanowisko na dworze księcia toskańskiego i prowadził dalej rozpoczęte przez niego prace naukowe. Spotkał się tu przedewszystkiem z zagadnieniem próżni. Starożytni twierdzili, że próżnia jest niemożliwa, gdyż natura ma obawę próżni (horror vacui). Galileusz zauważył we Florencji, przy okazji kopania pewnej głębokiej studni, że woda w pompach ssących podnosi się tylko do pewnego poziomu; wynikałoby stąd, że obawa próżni ma pewne granice. Torricelli wpadł na pomysł spraw-

dzenia do jakiego poziomu sięga obawa próżni, jeśli wodę zastąpić rtęcią. Wykonując wespół z Vivianim znane doświadczenie z rurką napełnioną rtęcią, przekonał się, że stosunek wysokości słupów wody i rtęci równy jest odwrotności stosunku gęstości tych cieczy. Torricelli pierwszy przypisał podnoszenie się słupka cieczy za tłokiem pompy ciśnieniu, które powietrze wskutek swego ciężaru wywiera na powierzchnię cieczy. budował on również na tej podstawie pierwszy barometr rtęciowy.

W r. 1644 wydał on dzieło „Del moto dei gravi", w którem podaje wyniki swych prac z hydrauliki. Badał on mianowicie szybkość wypływu cieczy z otworów i doszedł do wniosku, że szybkość ta zależy od wysokości poziomu cieczy nad tym otworem, czyli jest ta sama, jak szybkość ciała spadającego z tej wysokości [$v = \sqrt{2gh}$].

W tem samem dziele podaje Torricelli twierdzenie z dziedziny statyki, noszące nazwę zasady Torricellego, która opiewa, że jeżeli dwa ciężary tak są ze sobą związane, iż przy jakiemkolwiekbądź ich umieszczeniu ich środek ciężkości nie podnosi się ani obniża, to pozostają one w równowadze we wszystkich tych położeniach. Owocną działalność naukową Torricellego przerwała śmierć przedwczesna: umarł on bowiem w pięć lat po śmierci Galileusza w wieku lat trzydziestu dziewięciu.

PASCAL.

(1623 — 1662).

Blaise Pascal, wielki filozof i matematyk, przyszedł na świat we francuskiem mieście Clermont. Matka odumarła go w trzecim roku życia, i odtąd wychowaniem jego i kształceniem zajmował się jego ojciec, Etienne Pascal, człowiek bardzo wykształcony, zdolny matematyk. Pozostawał on w stosunkach przyjacielskich ze współczesnymi mu fizykami i matematykami, jak Mersenne, Roberval, Fermat i inni. Uczeni zbierali się co czas pewien, celem roztrząsania zagadnień matematycznych; kółko ich było zawiązkiem, z którego w r. 1666 minister Colbert utworzył Paryską Akademję Umiejętności. Młody Blaise Pascal, który wykazywał niezwykłe zdolności umysłowe, bywał zazwyczaj obecny na zebraniach naukowych swego ojca. Po pewnym jednak czasie, widząc przedwczesny rozwój syna

i obawiając się zresztą, aby upodobanie do matematyki nie odciągnęło go od studjów nad filologją klasyczną, do których go przeznaczał, Etienne Pascal usunął syna od tych zebrań i pozbawił go książek matematycznych. Wtedy to, mając lat dwanaście, samodzielnie dochodzi Pascal do niektórych twierdzeń Euklidesa, i ojciec zastaje go nad twierdzeniem o sumie kątów w trójkącie. Odtąd wolno mu było zajmować się matematyką, studjować dzieła Euklidesa i innych geometrów. Wybitny jego talent geometryczny dojrzał bardzo wcześnie. W wieku lat szesnastu napisał rzecz „O przecięciach stożkowych" (Essai pour les coniques, r. 1640), której wartość naukowa podnoszona była przez Leibnitza. Następnie zajmował się również własnościami cykloidy i innych krzwywych, w 19 roku życia wynalazł automatyczne liczydło do czterech działań. Do tego wynalazku skłoniła go pobudka praktyczna: ojciec polecił mu wykonanie pewnych obliczeń dla izby podatkowej, której prezesem był podówczas. Rachunki te nużyły młodego Pascala, i wolał on poświęcić znacznie więcej czasu i wysiłku twórczego na konstrukcję liczydła, niżeli na czysto mechaniczne wykonywanie obliczeń. Zajmował się on również pracami z arytmetyki teoretycznej. Około roku 1647 dowiedział się o doświadczeniach Torricellego z próżnią i postanowił doświadczenia te sprawdzić, a mianowicie, Pascal z zasady Torricellego wyprowadził wniosek: jeśli wysokość słupa rtęci utrzymywana jest przez ciśnienie powietrza, to wysokość ta musi być mniejsza na szczycie góry, niż u jej podnóża. Wniosek ten został sprawdzony doświadczeniem, wykonanem z polecenia Pascal'a przez szwagra jego Périer'a na szczycie i u podnóża góry Puy de Dôme, znajdującej się w pobliżu Clermont. Ciśnienie atmosfery zyskało ostatecznie prawo obywatelstwa w fizyce, zaś obawa próżni wraz z innemi „własnościami ukrytemi" przeszła do zabytków historycznych.

Wyniki swoich doświadczeń opisuje Pascal w rozprawie „Récit de la grande expérience de l'équilibre des liqueurs", wydanej w Paryżu w r. 1648; wyjątki z niej cytujemy poniżej.

Pascal zajmował się również doświadczeniami, dotyczącemi własności cieczy. Wyniki tych doświadczeń podał w rozprawie „Traité de l'équilibre des liqueurs", wydanej w Paryżu w r. 1663. Nie znając prac Stevina dochodzi on do podobnych wniosków, dotyczących ciśnienia cieczy na dno i ścianki naczynia i formułuje prawo, znane pod nazwą prawa Pascal'a.

Umysł jego prócz zagadnień matematycznych absorbowały głównie zagadnienia filozoficzne, jak zagadnienie bytu, nieśmiertelności du-

szy, wiary i wiedzy. W matematyce przejawiał się jego genjusz geometryczny, lecz nie znalazł on w dziełach P a s c a l'a pełnego wyrazu, gdyż poruszał on tematy geometryczne tylko dorywczo; w fizyce, która w życiu jego również była tylko epizodem, umiał on nie tylko stawiać zagadnienia teoretyczne, lecz i rozstrzygać je na drodze eksperymentu.

Zagadnienia filozoficzne doprowadziły go do mistycyzmu religijnego i do ascezy. Z pomiędzy dzieł filozoficznych najbardziej znane są jego „Myśli".

Nie tu miejsce na szczegółową analizę wszystkich przejawów tej bogatej i wzniosłej duszy. Przedwczesny i nadmierny wysiłek duchowy nadwerężył wątłe z natury zdrowie P a s c a l'a. Już w dwudziestym roku życia zaczął on cierpieć, i cierpienie fizyczne nie opuszczało go aż do śmierci.

P a s c a l umarł w wieku lat 39.

Opowiadanie o wielkiem doświadczeniu dotyczącem równowagi płynów [1]).

LIST PASCAL'A DO PERIER'A

15 listopada 1647 r.

Nie odrywałbym Pana od ciągłej pracy, związanej z Pańskim zawodem, aby zajmować Pana kwestjami fizycznemi, gdybym nie wiedział, iż są one dla Pana wypoczynkiem w wolnych chwilach i nieutrudzającą rozrywką...

To, co Panu dziś zakomunikuję, będzie tylko ciągiem dalszym naszych rozmów o próżni. Zna Pan mniemania filozofów, dotyczące tego przedmiotu: wszyscy oni uważali za pewnik, że natura obawia się próżni; i wszyscy niemal, co zatem idzie, utrzymywali, iż próżnia jest niemożliwością w naturze, która raczejby samą siebie zniszczyła, niżby przyjąć miała próżnię. W mej rozprawie o próżni starałem się zwalczyć to zdanie i sądzę, że dane doświadczalne, które zebrałem co do tej kwestji, wykażą jasno, że natura może pozostawić dowolnie wielką, wolną od wszelkiej materji przestrzeń, i że takową w rzeczywistości pozostawia.

---

[1]) „Récit de la grande expérience de l'equilibre des liqueurs". Wyjątki tu przytoczone wzięte zostały z książki Henri Coupin'a „Lectures scientifiques", Paryż u Colina r. 1911, oraz z książki Dannemanna: „Aus der Werkstatt grosser Forscher", Lipsk 1908.

Zajmuję się obecnie poszukiwaniem danych, które pozwoliłyby rozstrzygnąć, czy działanie, przypisywane obawie próżni, może być sprowadzone do czegoś podobnego, czy też powodowanem jest przez ciężkość i ciśnienie powietrza. Obmyśliłem doświadczenie, które powinno kwestję tę wyjaśnić, o ile będzie wykonane z odpowiednią ścisłością.

Chodzi o wykonanie znanego [1]) doświadczenia z próżnią kilkakrotnie tego samego dnia, w tej samej rurce, z tą samą rtęcią raz po raz to u podnóża, to na szczycie góry, wzniesionym najmniej na pięćset do sześciuset tuazów [2]), aby sprawdzić, czy wysokość słupka rtęci w rurce w obu wypadkach będzie jednakowa, czy też różna. Poznaje Pan już zapewne, że doświadczenie to rozstrzygnie kwestję, i że, jeśli wypadnie wysokość rtęci mniejsza na szczycie, niż u podnóża góry (co skłonny jestem przypuszczać, pomimo przeciwnego przekonania tych wszystkich, którzy się nad tą sprawą zastanawiali), wyniknie stąd niezawodnie, iż ciężkość i ciśnienie powietrza stanowią jedyną przyczynę tego zatrzymania się rtęci, nie zaś obawa próżni; jest bowiem rzeczą pewną, iż o wiele więcej powietrza ciąży u podnóża góry, niż na jej wierzchołku; trudno jest natomiast przypuszczać, iż natura bardziej obawia się próżni u podnóża, niż na wierzchołku góry. Wykonanie tego doświadczenia związane jest z pewnemi trudnościami. Trzebaby do tego celu znaleźć dostatecznie wysoką górę w pobliżu miasta. Musiałby się przytem znajdować tam ktoś, kto doświadczenie to potrafiłby wykonać z należną starannością. Ponieważ trudnoby było znaleźć poza Paryżem kogoś odpowiedniego, również jak i miejsce, odpowiadające warunkom doświadczenia, przeto uszczęśliwiony jestem, iż znalazłem zorówno osobę, jak i miejsce, ponieważ miasto Clermont leży u podnóża góry Puy-de-Dôme 500 tuazów wysokiej, i dalej, ponieważ żywię nadzieję, iż Pan zechce sam to doświadczenie wykonać.

LIST PÉRIER'A DO PASCAL'A

22 września 1648 r

Nareszcie wykonałem doświadczenie, którego od tak dawna Pan sobie życzył. Przesyłam Panu poniżej dokładne sprawozdanie.

W sobotę 19-go bieżącego miesiąca pogoda była zmienna; pomimo to koło godziny piątej zrana zdawało się być dość ładnie, i ponieważ wierzchołek Puy-de-Dôme był odsłonięty, zdecydowałem się wejść

[1]) Doświadczenie z rurką Torricellego.

[2]) Toise — miara francuska = 1,949 metra.

nań, aby wykonać doświadczenie. Powiadomiłem przeto o tem kilku szanownych obywateli miasta Clermont, którzy prosili mnie, abym ich uprzedził o dniu, kiedy się tam udam; pomiędzy nimi było kilku duchownych, pozatem — świeccy... Wszyscy — ludzie wielce uzdolnieni nietylko w kierunku swego zawodu, lecz również w naukach, to też byłem zachwycony, iż mogę w ich towarzystwie urzeczywistnić ten piękny zamiar. Zebraliśmy się więc wszyscy dnia tego koło godziny ósmej zrana w ogrodach Ojców Minimów, które znajdują się w najniższej niemal okolicy miasta, i rozpoczęliśmy tam doświadczenie w sposób następujący. Naprzód nalałem do naczynia szesnaście funtów rtęci, którą czyściłem przez trzy dni poprzednie, i, wziąwszy dwie rurki szklane równej grubości, długości czterech stóp, hermetycznie zatopione z jednego końca i otwarte z drugiego, wykonałem z każdą z nich wiadome doświadczenie z próżnią w tem samem naczyniu, poczem, gdy zbliżyłem i zetknąłem ze sobą obie rurki, nie wyjmując ich z naczynia, okazało się, iż rtęć, pozostała w każdej z nich, znajdowała się na tym samym poziomie — dwadzieścia sześć cali i trzy i pół linji ponad poziomem rtęci w naczyniu. Przerobiłem to doświadczenie w tem samem miejscu, w tych samych dwóch rurkach, z tą samą rtęcią i w tem samem naczyniu jeszcze dwa razy i ciągle wypadało, że rtęć w obu rurkach jest na tym samym poziomie i na tej samej wysokości, co za pierwszym razem.

Poczem pozostawiłem jednę z tych rurek w naczyniu dla porównania, zaznaczyłem na szkle wysokość rtęci i, pozostawiając tę rurkę na tem samem miejscu, uprosiłem R. P. Chastin'a, jednego z miejscowych mnichów, człowieka równie pobożnego, jak uzdolnionego i znającego się bardzo dobrze na tych kwestjach, aby obserwował od czasu do czasu w ciągu dnia, czy nie zajdzie w niej jaka zmiana. Z drugą zaś rurką i z częścią tej samej rtęci udałem się w towarzystwie reszty panów na szczyt Puy-de-Dôme, wzniesiony ponad ogrodem klasztornym na jakieś pięćset tuazów, gdzie po wykonaniu tego samego doświadczenia w ten sam sposób, co w ogrodzie klasztornym, okazało się, że w tej rurce pozostawały tylko dwadzieścia trzy cale i dwie linje rtęci, gdy w ogrodzie klasztornym w tej samej rurce było dwadzieścia sześć cali i trzy i pół linji, — że więc pomiędzy poziomem rtęci w rurce w obu tych wypadkach zachodzi różnica trzech cali i półtorej linji. Napełniło to nas zachwytem i podziwem i tak nas zdumiało, że dla własnej przyjemności zapragnęliśmy powtórzyć doświadczenie. To też wykonałem je jeszcze pięć razy bardzo dokładnie w różnych punktach wierzchołka góry, zarówno pod dachem

w znajdującej się tam małej kaplicy, jak na otwartem powietrzu, zarówno w zaciszu, jak na wietrze, zarówno przy pięknej pogodzie, jak w czasie deszczu i mgły, która nas tam od czasu do czasu nawiedzała, — oczyszczając za każdym razem bardzo starannie rurkę z powietrza: za każdym razem znajdowałem tę samą wysokość poziomu rtęci w rurce, równą dwudziestu trzem calom i dwom linjom, a więc różną o trzy cale i półtorej linji od wysokości w ogrodzie klasztornym, równej dwudziestu sześciu calom i trzem i pół linjom, co też nas w zupełności zadowoliło.

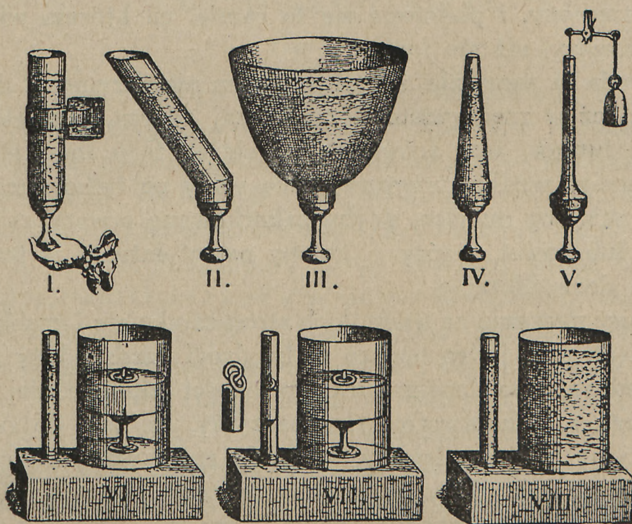
Później, schodząc z góry, przerobiłem w drodze to samo doświadczenie zawsze z tą samą rurką, tem samem żywem srebrem i tem samem naczyniem w miejscu, zwanem „Lafon de l'Arbre" i położonem znacznie ponad ogrodem klasztornym i znacznie niżej, niż wierzchołek góry; i znalazłem, że wysokość żywego srebra wynosiła tam dwadzieścia pięć cali. Przerobiłem doświadczenie po raz drugi w tem samem miejscu, i p. Mosnier, jeden z moich towarzyszy, przerobił je przez ciekawość sam: przerobił więc je również w tem samem miejscu, i ciągle wypadała ta sama wysokość, równa dwudziestu pięciu calom, mniejsza od tej, która została znaleziona w ogrodzie klasztornym, o cal i trzy i pół linji, oraz większa od tej, którą znaleźliśmy przed chwilą na szczycie Puy-de-Dôme, o cal i dziesięć linji; wzmogło to w znacznym stopniu nasze zadowolenie, gdyż widzieliśmy, iż wysokość żywego srebra zmniejsza się stosownie do poziomu danych miejsc.

Wreszcie, powróciwszy do ogrodu klasztornego, znalazłem tam naczynie, pozostawione dla porównania, w tej samej wysokości, w której je pozostawiłem, równej dwudziestu sześciu calom i trzem i pół linjom, w której to wysokości, według sprawozdania R. P. Chastin'a, który pozostawał przy rurce tej celem obserwowania jej, nie zaszła w ciągu całego dnia żadna zmiana, chociaż czas był bardzo niestały, chwilami pogodny, chwilami dżdżysty, to mglisty, to znów wietrzny.

Przerobiłem tam doświadczenie raz jeszcze z rurką, którą nosiłem na Puy-de-Dôme i w naczyniu, w którem znajdowała się rurka, pozostawiona dla porównania; znalazłem, że w obu rurkach żywe srebro znajdowało się na tym samym poziomie...

Rozprawa o równowadze płynów [1]).

Jeśli zawiesimy na ścianie kilka naczyń: jedno takie (rys. 18), jak na fig. I, drugie pochylone, jak na II, trzecie bardzo szerokie, jak na III, inne — wąskie, jak na IV, inne mające kształt wąskiej rurki zakończonej u dołu szerokiem, lecz bardzo niskiem naczyniem, jak na fig. V, i jeśli napełnimy je wszystkie wodą do tej samej wysokości, i jeśli wszystkie one będą miały otwory jednakowe u dołu, zakorko-



Rys. 18.
Doświadczalne stwierdzenie prawa Pascala o ciśnieniu na dno.

wane, aby zatrzymać wodę, doświadczenie wykazuje, że trzeba jednakowej siły, aby utrzymać te korki, chociaż ilość wody w tych różnych naczyniach jest różna, gdyż ma ona we wszystkich tę samą wysokość; i miarą tej siły jest ciężar wody, zawartej w pierwszem naczyniu, które ma kształt wszędzie jednostajny; gdyż jeśli woda ta waży sto funtów, potrzeba będzie siły stu funtów, aby utrzymać każdy z korków, — nawet korek piątego naczynia, chociażby woda w niem zawarta nie ważyła nawet uncji.

Aby to doświadczenie wykonać ściśle, trzeba zatkać otwór piątego naczynia kawałkiem drzewa, zawiniętego w materję, na wzór tłoka

[1]) „Traité de l'équilibre des liqueurs", Paris 1663. Powyższe wyjątki tłumaczone są z wypisów „Lectures scientifiques" Henri Coupin'a, Paryż, Colin, r. 1911.

pompy, którybyby wchodził i poruszał się w tym otworze, nie zatrzymując się zbytnio, jednak nie dopuszczając, aby woda wychodziła; do środka tego tłoka należy przymocować nitkę, przeciągnąć ją przez wąską rurkę, umocować do ramienia wagi i przywiązać do drugiego ramienia ciężar stu funtowy: zobaczymy, że nastąpi zupełne równowaga stu funtów i wody, ważącej jedną uncję, zawartej w wąskiej rurce. I jeśli ujmiemy coś z tego stofuntowego ciężaru, ciężar wody popchnie tłok na dół, a wskutek tego opuści się ramię wagi, na którem jest uczepiony, i podniesie się to ramię, na którem wisi ciężar niewiele mniejszy, niż sto funtów.

Gdyby woda ta zamarzła, i gdyby lód ten nie przymarzł do naczynia, jak się też w rzeczywistości zazwyczaj zdarza, potrzeba będzie ciężaru stu funtów, aby zrównoważyć ciężar tego lodu stopionego w wodę, chociaż według przypuszczenia waży on tylko uncję.

To samo miałoby miejsce, gdyby zakorkowane otwory znajdowały się z boku lub nawet u góry; i byłoby nawet łatwiej w ten sposób wykonywać doświadczenie.

Trzeba mieć naczynie ze wszystkich stron zamknięte i zrobić w niem u góry dwa otwory: jeden bardzo mały, drugi bardzo duży i przylutować na jednym i na drugim rurki szerokości odpowiedniej do wielkości każdego z tych otworów; i zobaczymy, że jeśli do rurki szerokiej włożymy tłok i nalejemy wody do rurki wąskiej, trzeba będzie położyć na tłoku duży ciężar, aby zapobiec temu, by ciężar wody w małej rurce nie wypchnął go do góry: tak samo jak w pierwszych przykładach trzeba było siły stu funtów, aby zapobiec temu, by ciężar wody nie wypchnął tłoka wdół, gdy otwór był na dole; gdyby zaś znajdował się z boku, trzebaby było równej siły, aby zapobiec temu, by ciężar wody nie wypchnął tłoka wbok. I jeśliby rurka napełniona wodą była sto razy szersza, lub sto razy węższa, jeśli tylko woda będzie w niej zawsze na tej samej wysokości, trzeba będzie zawsze tego samego ciężaru, aby zrównoważyć wodę i, jak tylko zmniejszymy ciężar, woda obniży się i podniesie zmniejszony ciężar.

Lecz, jeśli dolejemy do rurki wody na wysokość podwójną, trzeba będzie podwójnego ciężaru na tłoku, aby zrównoważyć wodę; i również, gdybyśmy w dwójnasób zwiększyli otwór, w którym znajduje się tłok, trzebaby podwoić siłę, potrzebną do utrzymania podwójnie dużego tłoka; widzimy stąd, iż siła potrzebna na to, aby powstrzymać wodę od wypływania przez dany otwór, jest proporcjonalna do wysokości wody, nie zaś do jej długości, i że miarą tej siły jest

zawsze ciężar całej wody, zawartej w słupie, mającym wysokość wody i przekrój otworu.

To co powiedziałem o wodzie, powinno stosować się do wszelkich innych płynów.

OTTO von GUERICKE.

(1602 — 1686).

Otto v. Guericke urodził się w Magdeburgu w pruskiej Saksonji. Studjował prawo w Lipsku, Helmsztacie i Jenie, zaś nauki matematyczne, głównie geometrję i mechanikę — w Leydzie. Następnie odbył podróż po Francji i Anglji. Po powrocie w roku 1627 zostaje radnym Magdeburga. Były to czasy burzliwe wojny trzydziestoletniej. W r. 1631 Magdeburg został zburzony przez Szwedów. Do r. 1636 pozostaje Guericke w służbie szwedzkiej, jako główny inżynier miasta Erfurtu. W r. 1646 zostaje burmistrzem rodzinnego miasta i zajmuje się jego odbudowaniem; buduje między innemi most na Elbie. W r. 1676 złożył urząd burmistrza i udał się do syna do Hamburga, gdzie umarł w r. 1686 w sędziwym wieku. Wśród czynnego i burzliwego życia zajmował się wiele zagadnieniami naukowemi; interesowała go ich strona doświadczalna. Najważniejsze jego doświadczenia dotyczą hydro- i aerostatyki. Pobudzony przez badania Galileusza, Torricellego i Pascala szuka sposobów wytworzenia próżni; tą drogą dochodzi do wynalezienia pompy pneumatycznej. Przy jej pomocy wykonywa różne doświadczenia, które wykazują ciśnienie powietrza. Najbardziej znanem jest doświadczenie z półkulami magdeburskiemi. Buduje on również barometr wodny.

Wszystkie te doświadczenia opisuje w dziele: „Ottonis de Guericke experimenta nova, ut vocantur magdeburgica de vacuo spatio" (Ottona de Guericke doświadczenia nowe, tak zwane Magdeburskie, nad przestrzenią próżną), napisanem w r. 1663, wydanem w Amsterdamie w r. 1672. W dziele tem Guericke wyraża przeświadczenie, że obawa próżni nie istnieje, i że przyczyną zjawisk jej przypisywanych jest ciśnienie atmosfery.

Doświadczenia Guericke'go, dzięki środkom, jakimi rozporządzał z urzędu oraz stosunkom jego z dworami, wykonywane były z przyrządami olbrzymich rozmiarów, publicznie (np. na sejmach), bardzo uroczyście i efektownie. Przyczyniły się one bardzo do spopu-

laryzowania wiedzy fizycznej. Prócz doświadczeń z dziedziny pneumatyki Guericke zajmował się również astronomją; był on zwolennikiem systemu Kopernika i pierwszy wypowiedział twierdzenie, że czas powrotu komet może być obliczony.

W kwestjach astronomicznych korespondował ze znanym astronomem i historykiem polskim, Stanisławem Lubienieckim, który należał do sekty religijnej socyniańskiej i był autorem dzieła „Theatrum cometicum", wydanego w Amsterdamie w r. 1668. Guericke zajmował się również zjawiskami elektrycznemi; wynalazł pierwowzór maszyny elektrycznej: kulę z siarki, osadzoną na osi, i pocieraną ręką; odkrył przyciąganie się ciał naelektryzowanych przeciwnie i utożsamił iskrę elektryczną z błyskawicą.

W bibljotece publicznej w Berlinie przechowywana jest pompa Guericke'go oraz półkule magdeburskie.

Otto v. Guericke, zdolny eksperymentator, wybitne miejsce w fizyce zawdzięcza głównie doświadczeniom z dziedziny pneumatyki.

Ottona v. Guericke'go nowe (t. zw.) Magdeburskie doświadczenia nad przestrzenią próżną [1].

ROZDZIAŁ II.

Pierwsza próba otrzymania próżni przez wyciągnięcie powietrza.

W czasie rozmyślań nad bezmiarem przestrzeni i nad tem, że musi ona znajdować się wszędzie, przyszło mi na myśl doświadczenie następujące: Napełnijmy wodą beczkę od wina lub piwa i zatkajmy ją szczelnie ze wszystkich stron, aby zewnętrzne powietrzne nie mogło przeniknąć do środka. W dolnej części beczki umocujmy rurę metalową, przy pomocy której woda może być wyciągana; woda wskutek swego ciężaru powinna wtedy opaść i pozostawić w beczce ponad sobą przestrzeń bez powietrza (a więc również bez jakiegokolwiek innego ciała), czyli próżnię.

Aby wynik odpowiedział temu rozważaniu, urządziłem sobie pompę mosiężną *a b c* (rys. 19) podobną do tych, jakich używa się w czasie pożarów, z tłokiem *g*, zaopatrzonym w kolbę i wykonanym bardzo dokładnie (tak, iż powietrze nie mogło wychodzić lub wchodzić po jego bokach).

---

[1]) „Ottonis de Guericke Experimenta Nova (ut vocantur) Magdeburgica de Vacuo Spatio" Amstelodami 1672. — Przekład niniejszy dokonany został z tłumaczenia niemieckiego F. Dannemana, wyd. w 59 t. „Klasyków" Ostwalda.

W pompie znajdowały się dalej dwie skórzane klapki, z których wewnętrzna *a* lub *d*, znajdująca się w przykrywce pompy, powinna była wpuszczać, zewnętrzna zaś *b* — wypuszczać wodę. Po przymocowaniu pompy (przy pomocy żelaznego kółka *e* opatrzonego czterema uszkami) do dolnej części *a* beczki — sprobowałem wyciągnąć wodę. Wpierw jednak, zanim woda mogła pójść za tłokiem, urwały się uszka i żelazne śruby, przy pomocy których pompa przymocowana była do beczki.



Rys. 19.

Otrzymywanie próżni w beczce.

Usiłowanie jednak nie było pozbawionem widoków powodzenia. Gdy zaradzono złemu przez zastosowanie mocniejszych śrub, mogli wreszcie trzej mocni mężowie (viri quadrati), którzy ciągnęli za kolbę pompy, wypchnąć przez górną klapę *b* wodę, idącą za tłokiem. Przytem dał się jednak słyszeć we wszystkich częściach beczki szmer taki, jakby się woda gwałtownie gotowała, i trwało to tak długo, dopóki w beczce miejsca wyciągniętej wody nie zapełniło powietrze.

Złu temu trzeba było w jakiś sposób zaradzić. Postarano się przeto o mniejszą beczkę i umieszczono ją wewnątrz większej. Gdy wówczas rura dłuższej pompy przeprowadzona została przez deski obu beczek, kazałem napełnić mniejszą beczkę wodą, uszczelnić otwór *i*, po napełnieniu wodą również większej beczki, rozpocząć pracę od

początku. Teraz udało się wyciągnąć wodę z mniejszej beczki, i na miejscu jej pozostała niewątpliwie próżnia.

Gdy jednak po upływie dnia zaprzestano pracy, i wszystko dokoła ucichło, dał się słyszeć zmienny, przerywany od czasu do czasu dźwięk, podobny do cichego ptasiego świergotu. Trwało to prawie całe trzy dni. Gdy otworzono mniejszą beczkę, znaleziono ją napełnioną w dużej części powietrzem i wodą. Niemniej jednak część jej



Rys. 20.
Opróżnianie kuli miedzianej.

była pusta, gdyż w czasie otwierania wtargnęło trochę powietrza.

Wszyscy byli zdumieni, że woda przeniknęła do beczki, tak starannie ze wszystkich stron zatkanej i uszczelnionej...

ROZDZIAŁ III.

Druga próba otrzymania próżni przez wyciąganie powietrza.

Gdy tym sposoebm zarówno obserwacja bezpośrednia, jak i doświadczenie dowodziły porowatości drzewa, wydało mi się, że bardziej odpowiednią dla mojego celu będzie kula miedziana (którą wielebny Ojciec Schott w swojej książce o doświadczeniach Magdeburskich nazywa „cacabus"). Pojemność tej kuli *A* równa była 60—70

miarom Magdeburskim, i była ona opatrzona u góry kurkiem mosiężnym *B*, z dołu zaś była szczelnie połączona z pompą. Następnie przystąpiłem, jak poprzednio, do wyciągania wody, a zarazem powietrza.

Początkowo tłok dawał się poruszać z łatwością, stopniowo jednak stawało się to coraz trudniejszem tak, że dwóch mocnych mężów zaledwie mogło tłok wyciągnąć. W czasie, gdy zajęci oni byli jeszcze poruszaniem tłoka tam i zpowrotem, i już myśleli, że usunęli prawie całe powietrze, kula metalowa została nagle zgnieciona z wielkim hukiem ku ogólnemu przerażeniu tak, jak się zgniata w palcach chustkę, lub jakby kula z gwałtownym łoskotem zrzucona została z wierzchołka wysokiej wieży.

Miedziana kula została zgnieciona przez powietrze zewnętrzne.

Przyczynę tego przypisałem niedbalstwu rzemieślników, którzy zrobili kulę może niedokładnie okrągłą. Powierzchnia płaska, gdziekolwiek się ona znajdowała, nie była w stanie wytrzymać ciśnienia otaczającego powietrza, gdy tymczasem kula, wykonana dokładnie, oparłaby się z łatwością, wskutek odpowiedniości swych części, które nawzajem dopomagają sobie w stawianiu oporu.

Kula dokładnie okrągła nie zostaje zgnieciona.

Było więc rzeczą konieczną, aby rzemieślnik sporządził kulę dokładnie okrągłą; powietrze z niej również było wyciągane początkowo z łatwością, następnie z trudem. Dowodem tego, że kula była w zupełności opróżniona, była ta okoliczność, iż z górnej klapy pompy powietrze przestało wreszcie wychodzić. W ten sposób po raz drugi otrzymano próżnię. Po otworzeniu kurka *B*, powietrze z taką siłą wtargnęło do miedzianej kuli, jakby pociągnąć miało człowieka, znajdującego się przed kurkiem.

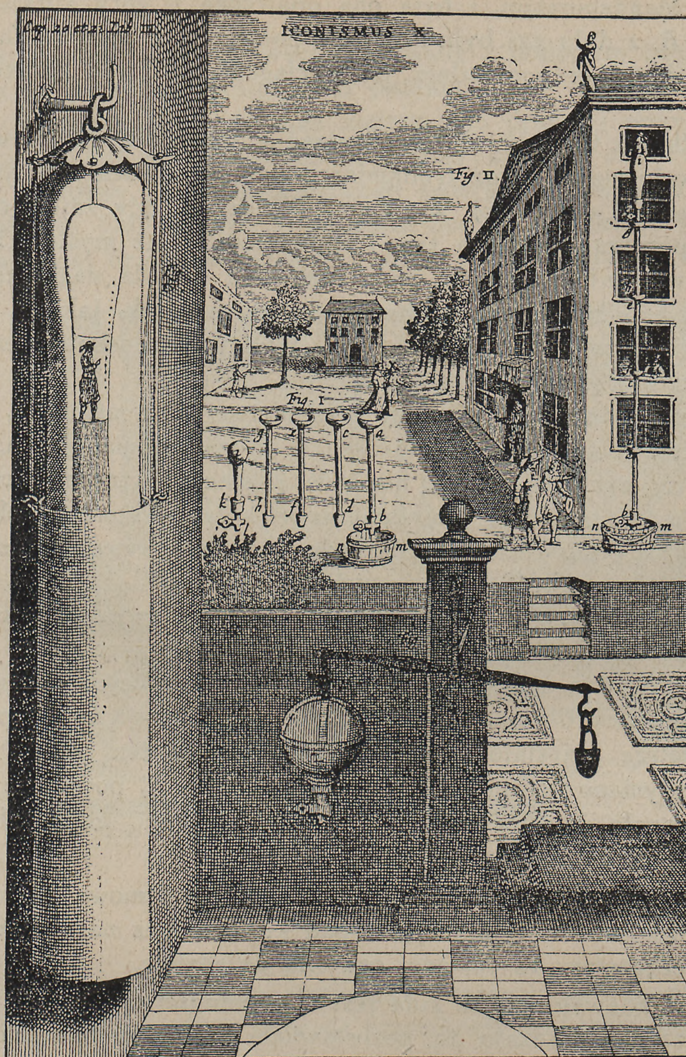
Powietrze wchodzi z wielką łatwością.

Nawet przy dość znacznej odległości twarzy tamowało dech; ręki również nie można było trzymać nad kurkiem bez narażenia się na niebezpieczeństwo, że zostanie ona siłą wciągnięta.

Chociaż zdawało się, że kula jest w zupełności opróżniona, jednak doświadczenie wykazało, że, pozostawiona jeden lub dwa dni w tym stanie, napełnia się znowu powietrzem, które wdzierało się zarówno przez tłok pompy, jak również przez klapę i kurek. Chodziło więc o to, aby i temu złu zapobiec, co też w dalszym ciągu opisane zostanie.

ROZDZIAŁ XX.

O innych podobnych doświadczeniach, które wykazują ciśnienie atmosfery oraz granicę, do której działa obawa próżni.



Rys. 21.
Barometr wodny.

Na podstawie poprzedniego doświadczenia można było poznać naocznie, iż natura dopuszcza istnienie próżni, i że to, co zwanem było zazwyczaj obawą próżni, pochodzi z panującego tu na dole ciśnienia powietrza (gdyż powietrze zewnętrzne wskutek swego ciężaru nie tylko wpędza wodę w miejsca, gdzie powstaje przestrzeń

wolna, lecz również podnosi ją tak wysoko, dopóki nie znajdzie się ona w równowadze z powietrzem); nasunęły się więc dwa inne, proste sposoby wyznaczenia ciężaru powietrza i sprowadzenia doń obawy próżni.

Sposób pierwszy.

Należy kazać zrobić z blachy mosiężnej rury, czyli kanały *ab, cd, ef, gh* (rys. 21), długości czterech do pięciu łokci, grubości małego palca, któreby się dały w różny sposób łączyć i rozłączać, tworząc w ten sposób dłuższą lub krótszą rurę. Końce ich powinny być tak urządzone, aby jeden wchodził szczelnie w drugi, np. *d* w *a, f* w *c, h* w *e*. Połączenia te muszą być zarazem otoczone wodą, którą, aby przeszkodzić przenikaniu powietrza, wlewa się w naczynia *a, c, e, g*, mające kształt miseczek.

Następnie należy ze sobą połączyć trzy rury w jedną i ustawić je przy ścianie jakiegoś domu. Koniec dolnego kanału *ab* powinien posiadać w *b* mały kurek do otwierania i zamykania. Zaś górna część trzeciej i czwartej rurki powinna mieć zakończenie, dające się dokładnie połączyć z kurkiem *l* szklanego naczynia *ikl* tak, aby powietrze nie miało dostępu. (Naczynie *ikl*, wyobrażone na fig. 5 rys. 21, jest długie na 2 łokcie lub więcej). Gdy już uprzednio pod wodą stwierdzonem zostanie, że rurki te nie przepuszczają najmniejszego pęcherzyka powietrza, łączy się ze sobą pierwsze trzy rurki *ab, cd, ef* i ustawia się je przy ścianie domu za pierwszym razem np. do wysokości 15 lub 16 łokci. Przytem dolny kurek powinien być zamknięty i zanurzony w naczyniu *mn*, napełnionem wodą. Następnie należy zarówno te rury, jak i wspomniane szklane naczynie *ikl* napełnić wodą i nasadzić je kurkiem *l* na górne zakończenie kanału *ef*. Jeśli następnie otworzymy oba kurki, to zobaczymy, że woda w naczyniu nie opada wcale. Przyczyną tego jest okoliczność, że, chociaż łączna wysokość kanałów i naczynia wynosi 17 lub 18 łokci, powietrze zewnętrzne jednak ciśnie silniej, niż słup wody wysokości 17 lub 18 łokci. Dlatego też nie może mieć miejsca opadanie. Jeśli jednak powtórzymy to doświadczenie i użyjemy doń jeszcze kanału *gh*, długości dwóch, trzech lub czterech łokci tak, że łączna długość kanału wraz ze szklanem naczyniem wyniesie 20, 21 lub nawet 30 i więcej łokci, wówczas, jak zobaczymy, woda opuści kolbę szklaną, i poziom jej będzie się wahał wewnątrz kanału szklanego; wreszcie zauważymy jednak, że w swych wahaniach zatrzyma się na wysokości 18 — 19 łokci.

Woda pozostaje w równowadze z ciśnieniem słupa powietrza.

Sposób drugi.

Należy przygotować rury, czyli kanały, jak poprzednio, i naczynie szklane, które chemicy zazwyczaj nazywają kolbą. Naczynie to, zaopatrzone w nasadę blaszaną i kurek, należy opróżnić z powietrza oraz połączyć w g z kanałem, ustawionym pod ścianą (który swym dolnym otwartym końcem musi być zanurzony w naczyniu, napełnionem wodą). Jeśli potem otworzymy kurek naczynia, zauważymy, iż woda szybko podnosi się w kanale, aż do wymienionej wysokości, wynoszącej około 19 łokci. Dzieje się to, gdyż powietrze zewnętrzne wywiera ciśnienie na wodę w naczyniu, woda zaś znajduje wolne ujście w opróżnioną przestrzeń i wznosi się tak wysoko, jak wysoko otaczające powietrze naskutek swej ciężkości jest w stanie wodę podnieść.

Woda nie może być przy pomocy lewara podniesiona ponad wys. 19 łokci.

Rozważmy, co wynika z tych doświadczeń:

1) Że przy pomocy lewara woda nie może być przeprowadzona ponad górą lub jakimś innym przedmiotem, którego wysokość wynosi więcej, niż 18 łokci.

Do jakiej wysokości może być podniesiona woda przy pomocy urządzeń ssących.

2) Że w rurach studni przy pomocy urządzeń ssących lub machin podnoszących, których klapa lub tłok znajduje się ponad wysokością 18 łokci, woda nie może być podnoszona...

Również wiele innych rzeczy, dotąd niezrozumiałych, można wyjaśnić zapomocą tych doświadczeń. Zakomunikowałem o tem Caspar'owi Schott'owi 30 grudnia 1661 r. w odpowiedzi listownej, którą przedrukował on w swojej „Technica Curiosa" w księdze I. o „Dziwach Megdeburskich" w rozdziale 21. Słowa listu na str. 52 brzmią jak następuje:

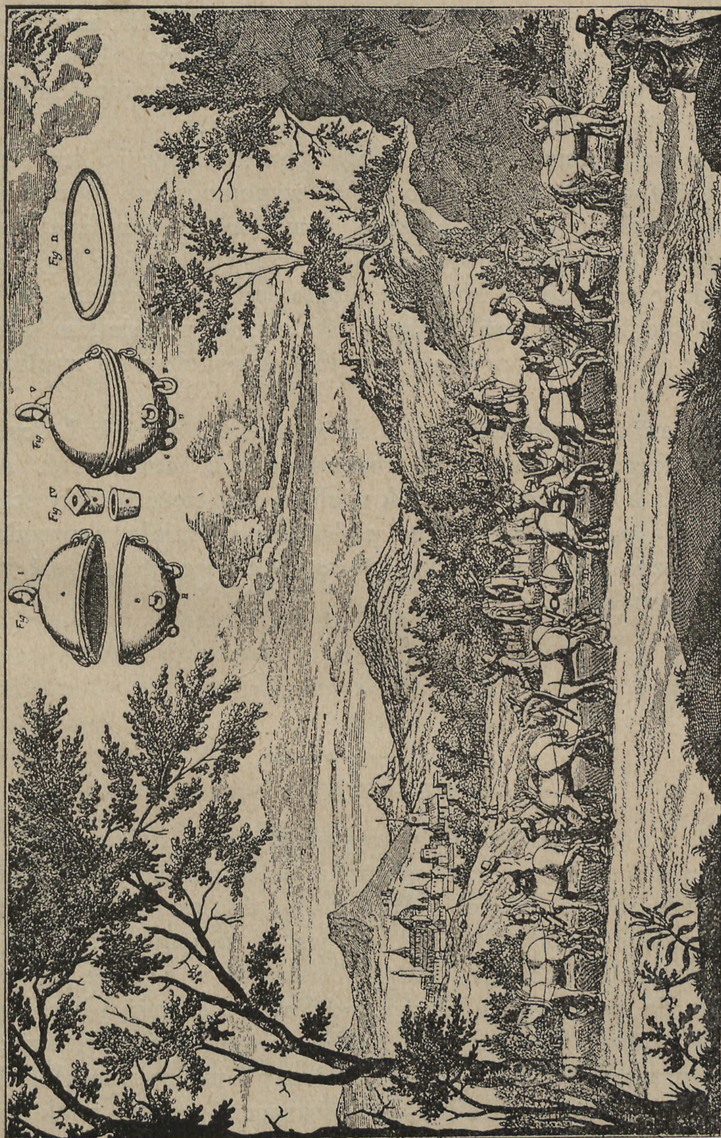
„Aby w każdym czasie móc dostrzegać ciśnienie powietrza, posługiwałem się osobliwem narzędziem: umieściłem mianowicie drobną figurkę rzeźbioną w drzewie w kształt człowieka, która podnosiła się i opuszczała wewnątrz rurki szklanej i palcem wskazywała punkt, odpowiadający panującemu w danej chwili ciśnieniu powietrza. Urządzenie zaś, znajdujące się w dolnej części rurki szklanej, przykryte jest, aby widzowie nie mogli dojść do poznania tajemnicy. Szkło zakryte jest bowiem dokoła blachą i dobrze ochronione, aby wszystkie połączenia pozostały niezmienne i całość nie była łamliwa. Urządzenie to nazywam „Semper vivum"; może ono też słusznie być nazwane „Perpetuum mobile", chociaż nie porusza się ciągle, lecz tylko odpowiednio do zmian powietrza w rozległym obszarze tegoż".



Wyd. „Mathesis Polska".

ROZDZIAŁ XXIII.

Doświadczenie, które wykazuje, że wskutek ciśnienia powietrza, dwie półkule zostają tak mocno połączone, że nie mogą być od siebie oderwane siłą 16 koni.



Rys. 22. Doświadczenie z półkulami Magdeburskiemi.

Kazałem wykonać dwie miedziane półkule, czyli miski *A* i *B* (rys. 22) około $^3/_4$, dokładniej $^{67}/_{100}$ łokcia magdeburskiego średnicy. Były one szczelnie do siebie dopasowane, i jedna z nich zaopatrzona była w kurek, czyli raczej klapę *H*, przy pomocy której powietrze, znajdujące się wewnątrz niej, miało być wyciągnięte, i która broniła dostępu powietrzu zewnętrznemu, jak to pokazuje rysunek IV. Półkule, prócz tego, opatrzone są żelaznemi kółkami *NNNN*, aby mogły być do nich zaprzęgnięte konie, jak widać na rysunku. Prócz tego kazałem uszyć ze skóry krążek *D*, który był dobrze przepojony woskiem z terpentyną, aby nie przepuszczał powietrza.

Półkule te nałożyłem jednę na drugą, przedzielając je krążkiem; powietrze następnie zostało szybko z nich wypompowane. Widziałem, z jaką siłą zostały połączone półkule, pomiędzy któremi znajdował się ów krążek. Ciśnieniem powietrza zewnętrznego ściśnięte, były one złączone tak mocno, że 16 koni nie mogło ich wcale rozerwać, lub z wielkim tylko trudem. Jeśli jednak ostatecznie, po wielkim wysiłku, udało się je rozerwać, wywoływało to huk podobny do wystrzału armaty.

Po wejściu powietrza półkule mogą być oddzielone z łatwością

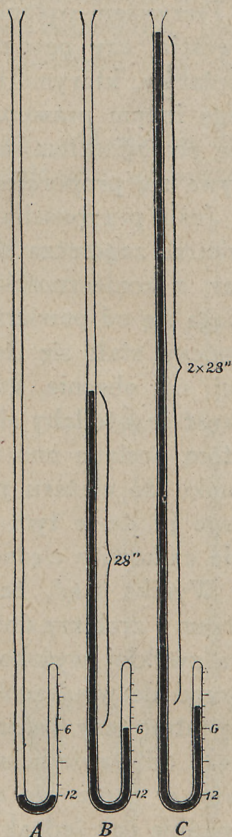
Skoro jednak po otwarciu kurka *H* powietrzu dany był dostęp, mogły być one rozdzielone, czyli rozerwane siłą samych rąk. Aby jednak dokładnie się dowiedzieć, jak wielkim jest ciężar, który ściska tak gwałtownie półkule, należy na podstawie rozdziału poprzedniego znaleźć ciężar słupa powietrza, którego średnica równa jest $^{67}/_{100}$ łokcia magdeburskiego...

BOYLE.

(1627 — 1691).

R o b e r t B o y l e pochodził z arystokratycznej rodziny irlandzkiej; wychowanie odebrał bardzo staranne, prowadził studja w Szwajcarji, we Włoszech i Francji. Wróciwszy do kraju, odziedziczył po ojcu znaczny majątek, osiadł na wsi i zajmował się zagadnieniami z dziedziny filozofji i religji. Następnie w r. 1684 przeniósł się do Oksfordu, pracował tu więcej nad fizyką i chemją i brał czynny udział w pracach Towarzystwa Królewskiego, którego przez czas pewien był prezesem. B o y l e nie był żonaty i nie zajmował żadnego urzędu; cały swój czas i majątek poświęcił pracom naukowym, religijnym i filozoficznym. Dzieła G u e r i c k e'g o pobudziły go do

doświadczeń w tym samym kierunku; buduje on pompę pneumatyczną z pewnemi modyfikacjami i wykonywa różne doświadczenia z powietrzem rozrzedzonem. Eksperymentując z rurką zgiętą w kształt litery U, z jednem ramieniem krótszem i hermetycznie zatopionem (rys. 23), dochodzi do wykrycia znanego prawa, któremu zawdzięcza nazwisko w fizyce. Przeciwnik fizyki perypatetycznej, Boyle zasadnicze znaczenie przypisywał tylko doświadczeniu. Niechęć do wyjaśnień scholastycznych — rozciągał do wyjaśnień zjawisk, t. j. do teorji wogóle. To też dziełom jego brak filozoficznego ujęcia, brak uogólnień teoretycznych. Wykonywując np. doświadczenia, dotyczące prężności gazów, ułożył tabelkę, w której zestawione są odpowiednio objętości i ciśnienia, lecz nie on sam, tylko uczeń jego, Ryszard Townley, z tabelki tej wyczytał ogólne prawo fizyczne.



Rys. 23.
Doświadczenie Boyle'a.

MARIOTTE.

(1620 — 1684).

Edme Mariotte urodził się w Burgundji. Od wczesnej młodości obrał sobie zawód duchownego i był przeorem w małem miasteczku w pobliżu Dijon. Zajmował się obok tego badaniami naukowemi, dotyczącemi różnych dziedzin fizyki. Był on jednym z założycieli Paryskiej Akademji Umiejętności. Prace Galileusza i Torricellego pobudziły go do doświadczeń fizycznych, które go doprowadziły w r. 1679 do wykrycia znanego prawa, dotyczącego stosunku pomiędzy objętością gazów a ciśnieniem. Prawo to było już w r. 1662, a więc o 17 lat wcześniej, wykryte przez Boyle'a. Mariotte jednak wykrył je niezależnie od Boyle'a i sformułował dokładniej. Znane jest ono, jako prawo Boyle-Mariotte'a. Dzieła Mariotte'a wydane zostały w r. 1717 w 2 tomach w Leydzie. Prawo Mariotte'a zawarte jest w rozprawie „De la Nature de l'Air", wydanej w roku 1679.

Rozprawa o własnościach powietrza [1]).

Zgęszczanie powietrza odbywa się proporcjonalnie do ciężarów, którymi jest ono obciążone.

Pierwszem pytaniem, które można sobie co do tego postawić, jest kwestja, czy powietrze zagęszcza się dokładnie proporcjonalnie do ciężarów, którymi jest ono obciążane, czy też to zagęszczanie podlega innym prawom i innym stosunkom. Oto rozumowania, któremi się posługiwałem, aby rozstrzygnąć, czy zagęszczanie powietrza odbywa się proporcjonalnie do ciężarów, które je gniotą.

Jeśli przypuścimy, jak na to wskazuje doświadczenie, iż powietrze zagęszcza się bardziej, gdy jest obciążone przez większy ciężar, z koniecznością stąd wyniknie, iż jeśliby powietrze, które rozciąga się od powierzchni ziemi aż do największej wysokości, gdzie się kończy, stało się lżejszem, to dolna część jego rozprężyłaby się więcej, niż obecnie, gdyby zaś stało się ono bardziej ciężkie, ta sama część zagęściłaby się bardziej. Stąd wywnioskować należy, iż gęstość, którą posiada ono w pobliżu ziemi, znajduje się w określonym stosunku do ciężaru powietrza, znajdującego się nad niem i uciskającego je, że w tym stanie równoważy ono swą sprężystością dokładnie całkowity ciężar powietrza, które podtrzymuje.

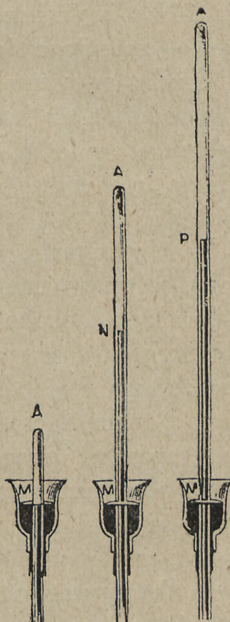
Wynika stąd, że jeżeli zamkniemy w barometrze rtęć z powietrzem i zrobimy doświadczenie z próżnią, rtęć nie pozostanie w rurce na zwykłej wysokości: gdyż powietrze, które jest w niej zamknięte przed doświadczeniem, sprężystością swoją równoważyło ciężar całej atmosfery, to znaczy słupa powietrza tej samej grubości, sięgającego od powierzchni rtęci w naczyniu, aż do końca atmosfery; rtęć więc w rurce, nie znajdując nic, coby ją równoważyło, opadnie. Nie spadnie ona jednak całkowicie; gdyż, podczas jej opadania, powietrze zamknięte w rurce rozszerza się, i wskutek tego sprężystość jego już nie wystarcza, aby zrównoważyć całkowity ciężar górnego powietrza. Trzeba więc, aby część rtęci pozostała w rurce na takiej wysokości, aby zrównoważyła resztę atmosfery, gdyż powietrze, zamknięte w rurce, wskutek swej gęstości, ma siłę sprężystości, odpowiednią do utrzymania tylko części ciężaru atmosfery; i wtedy nastąpi równowaga pomiędzy ciężarem całego tego słupa powietrza i ciężarem tej pozostałej rtęci, łącznie z siłą sprężystości zamkniętego powietrza.

---

[1]) „Discours de la nature de l'air", Leyde 1717. Wyjątki tu podane przetłumaczone są z książki Henri Coupin'a „Lectures scientifiques sur la Physique", Paryż, Colin r. 1911.

Więc jeśli powietrze zgęszcza się proporcjonalnie do ciężarów, którymi jest obciążone, w doświadczeniu zaś rtęć znajduje się w rurce na wysokości 14 cali, musi być koniecznie powietrze zamknięte w rurce rozprężone dwa razy więcej, niż przed doświadczeniem, jeśli w tym samym czasie barometry bez powietrza podnoszą rtęć dokładnie na 28 cali.

Aby przekonać się, czy wniosek ten jest słuszny, wykonałem doświadczenia z p. Hubin, który jest bardzo doświadczony w sporządzaniu barometrów i termometrów różnego rodzaju. Posługiwaliśmy się rurką długą na 40 cali (rys. 24), którą kazałem napełnić rtęcią do 27 i pół cala, tak, aby zostało tam 12 i pół cala powietrza i tak, aby po zanurzeniu rurki na jeden cal, pozostało jeszcze 39 cali, zawierających 14 cali rtęci i 25 cali powietrza, rozszerzonego w dwójnasób. Oczekiwania moje bynajmniej mnie nie zawiodły: skoro tylko koniec odwróconej rurki pogrążony został w rtęci naczynia, rtęć w rurce obniżyła się i po kilku wahnięciach zatrzymała się na wysokości 14 cali; zamknięte więc powietrze, które zajmowało teraz 25 cali, rozszerzyło się w dwójnasób w porównaniu z tem, które było zamknięte i które zajmowało tylko 12 i pół cala.



Rys. 24.
Rurka Mariotte'a

Poleciłem p. Hubin wykonanie jeszcze drugiego doświadczenia, przy którem pozostawiliśmy 24 cale powietrza ponad rtęcią, która opadła, zgodnie z hipotezą, do 7 cali; gdyż siedm cali rtęci równoważy jedną czwartą ciężaru całej atmosfery, pozostałe zaś trzy czwarte były podtrzymywane przez sprężystość zamkniętego powietrza, którego objętość wynosiła 32 cale; była ona w tym samym stosunku do objętości pierwotnej równej 24 calom, jak ciężar całkowity powietrza do trzech czwartych tego ciężaru.

Poleciłem mu, aby wykonał jeszcze kilka podobnych doświadczeń, pozostawiając więcej lub mniej powietrza w tej samej rurce, lub też w innych rurkach większych lub mniejszych, i znajdowałem zawsze po wykonaniu doświadczenia, że stosunek powietrza rozprężonego do objętości powietrza, które pozostawiono ponad rtęcią na początku

doświadczenia, był ten sam, co stosunek 28 cali rtęci, równych ciężarowi całej atmosfery, do różnicy pomiędzy 28 calami a wysokością rtęci przy końcu doświadczenia: dowodzi to w zupełności, iż można przyjąć za prawidło pewne, czyli prawo natury to, iż powietrze zgęszcza się proporcjonalnie do ciężarów, którymi jest obciążone.

Chcąc wykonywać doświadczenia bardziej dokładne, trzeba mieć rurkę zagiętą, której dwa ramiona są względem siebie równoległe, i jedno z nich jest długie na 8 stóp w przybliżeniu, drugie zaś — na 12 cali; większe ramię powinno być u góry otwarte, zaś mniejsze — zatopione dokładnie.

Trzeba najpierw nalać trochę rtęci, aby zapełnić dno, przez które oba ramiona się komunikują, i należy postarać się, aby rtęć nie stała wyżej w jednem naczyniu, niż w drugiem, aby powietrze zamknięte nie było bardziej rozszerzone lub ściśnięte, niż powietrze wolne.

Następnie należy dolewać powoli rtęć do rurki, uważając, aby przy wstrząśnieniu nie weszło nowe powietrze do tego, które jest zamknięte; i okaże się, jak to miałem parę razy sposobność widzieć, że kiedy rtęć w małem ramieniu stoi na wysokości czterech cali, to w drugiem rtęć będzie miała poziom o 14 cali wyższy, t. j. 18 cali ponad rurką łączącą; co też powinno mieć miejsce, jeśli powietrze zagęszcza się proporcjonalnie do ciężarów, którymi jest obciążone, gdyż powietrze zamknięte jest wówczas obciążone ciężarem atmosfery, który jest równy ciężarowi 28 cali rtęci z dodatkiem 14 cali, których suma równa 42 calom, ma się do 28 cali, t. j. pierwszego ciężaru, który utrzymywał powietrze w objętości 12 cali w małem ramieniu, odwrotnie, jak objętość 12 cali ma się do objętości pozostałych 8 cali.

Przy ponownem dolaniu rtęci tak, by się ona podniosła na wysokość 6 cali w małej rurce, i tak, że zostanie tylko 6 cali powietrza, poziom rtęci w drugiem ramieniu będzie o 28 cali wyższy od poziomu tych 6 cali, co też powinno zachodzić zgodnie z tą hipotezą: gdyż wówczas powietrze zamknięte będzie obciążone 28 calami rtęci oraz ciężarem atmosfery, który wart jest drugie tyle; suma więc ich 56 jest podwojeniem liczby 28 tak, jak pierwsza objętość 12 cali powietrza jest dwa razy większa od pozostałych 6 cali; i jeśli przy dalszem nalewaniu rtęci do dużego ramienia wzniesie się ona w małem ramieniu na wysokość 8 cali, to poziom jej w dużem ramieniu będzie o 56 cali wyższy, co daje znowu tę samą proporcję...

Do wykonywania tych doświadczeń niezbędnem jest, aby małe ramię miało wszędzie tę samę szerokość; co zaś dotyczy dużego, to nie jest koniecznem, aby szerokość jego na całej wysokości była równa.

Przy pomocy tego prawa natury można rozstrzygnąć kilka, dość ciekawych, zagadnień fizycznych.

Rozdział IV.

FIZYKA NEWTONJAŃSKA. MECHANIKA ANALITYCZNA.

ISAAC NEWTON.

(1642 — 1727).

O NEWTONIE powiedział Laplace, że „był on nietylko największym, lecz i najszczęśliwszym z pośród myślicieli, gdyż teorję świata raz tylki można stworzyć". Jego idea ciążenia powszechnego jest wspaniałą syntezą ruchów ciał niebieskich, opisanych przez Kopernika i Kepplera, jest dynamicznem ujęciem kopernikańskiej kinematyki nieba. Stworzył on również podstawy dynamiki nowoczesnej; jego słynne „leges motus", czyli trzy zasady dynamiczne, stanowią do dziś niewzruszone podstawy mechaniki. Mechanika newtonjańska, wprowadzając obce geometrji pojęcie siły, jest przeciwstawieniem mechaniki kartezjańskiej, która przyjmowała jedynie postać i ruch jako elementy wszystkich zjawisk fizycznych.

Isaac Newton urodził się (w roku śmierci Galileusza) w wiosce Woolsthorpe w hrabstwie Lincoln w pobliżu miasteczka Grantham. Ojciec jego zajmował się rolnictwem i był właścicielem małej fermy. Umarł on w parę miesięcy przed przyjściem na świat syna, który był dzieckiem przedwcześnie urodzonem, drobnem i słabowitem.

Matka jego w parę lat później wyszła za pastora Smitha, powierzając Isaaca opiece babki. Pierwszą naukę pobierał Newton w wiejskich szkółkach, poczem w wieku lat dwunastu posłany został do szkoły w Grantham.

Początkowo nie odznaczał się on ani pilnością, ani uwagą i zajmował jedno z ostatnich miejsc w klasie.

Z uśpienia duchowego obudziła go zraniona ambicja: postanowił on wyprzeć ze stanowiska prymusa w klasie — chłopca, który go wybił. Odtąd Isaac uczył się dobrze. Z powodu wątłego zdrowia nie brał

on udziału w hałaśliwych zabawach kolegów, lecz wolny czas obracał na budowanie zabawek mechanicznych jak wiatraki, latawce, zegary wodne i słoneczne, wózki, przypominające konstrukcją rowery. Kiedy Newton miał lat piętnaście, matka jego owdowiała po raz drugi i, powróciwszy do swojej wioski, wezwała do siebie najstarszego syna, który miał jej odtąd pomagać w gospodarstwie; jednak do funkcyj praktycznych, związanych z uprawą i sprzedażą zboża i jarzyn, okazał się Newton zupełnie nieprzydatny: wysyłany na rynek ze starym służącym, jemu powierzał załatwianie interesów, sam zaś spędzał czas nad rozwiązywaniem zadań matematycznych, siedząc gdzieś pod płotem, lub na wertowaniu książek w domu p. Stokes'a, u którego mieszkał, będąc jeszcze w szkole. Zamiłowanie jego do matematyki i mechaniki zaznaczało się coraz wybitniej, absorbując umysł jego całkowicie.

Wiemy, że w czasie wielkiej burzy w r. 1658 mierzył on siłę wiatru długością skoku z wiatrem i przeciw wiatrowi. Wiemy również, że na ścianie swego domostwa kreślił zegary słoneczne, z których jeden służył do użytku przez czas dłuższy i znajduje się obecnie w Londyńskiem Towarzystwie Królewskiem, dokąd w r. 1844 został przeniesiony kamień, ostrożnie wyjęty ze ściany domu Newton'a. Wreszcie wuj jego, pastor Ayscough, widząc wyraźne skłonności chłopca w kierunku matematyki, namówił matkę do oddania go do Trinity-College w Cambridge. Przygotowany niedostatecznie, potrafił jednak Newton w krótkim czasie wiadomości swe uzupełnić, studjując logikę oraz pisma matematyczne Kartezjusza, dzieła Kepplera i swoich profesorów Barrow'a i Wallis'a („Arithmetica infinitorum"). Zetknął się również z geometrją Euklidesa, która jednak w tej epoce jeszcze nie trafiła mu do przekonania. Dzieła przeczytane wywarły wybitny wpływ na kierunek jego myśli. Dzieło Wallis'a nasunęło mu prawdopodobnie pomysły, dotyczące jego teorji fluxji (fluentes), którą odnieść należy do tego czasu i która posłużyła mu następnie do jego wyliczeń; jest to metoda matematyczna, pokrewna rachunkowi różniczkowemu, który w tym samym czasie został wynaleziony przez Leibnitza; różni się odeń tylko znakowaniem. Do tego czasu odnosi się również wykrycie własności dwumianu, noszącego jego nazwisko. Z drugiej strony Barrow dał mu do przejrzenia rękopis swojej optyki i polecił mu przerobienie niektórych opisanych tam doświadczeń. Doświadczenia te w dalszej konsekwencji doprowadzają Newtona do wykrycia zjawisk rozszczepienia światła. W r. 1665 uzyskuje Newton stopień bakała-

rza. W tym też roku w Cambridge wybuchła epidemja i Newton spędza czas pewien na wsi u matki. Tego czasu dotyczy znana opowieść Voltaire'a, o tem, że jabłko, spadające z drzewa, miało nasunąć Newtonowi ideę ciążenia powszechnego. W rzeczy samej po powrocie do Cambridge, Newton wykonywa pierwsze obliczenia, będące w związku z zasadą grawitacji; nie doprowadzają one jednak do pożądanego rezultatu, gdyż dane, dotyczące długości południka ziemskiego, któremi posługiwał się Newton, były niedokładne. W dwudziestym czwartym roku życia Newton był już w posiadaniu zasadniczych idei, które stanowiły treść jego wielkich odkryć w dziedzinie optyki i mechaniki. Dalsza jego działalność naukowa polega na rozwinięciu ich i ugruntowaniu.

W r. 1667 Newton uzyskał stopień magistra; w tym czasie zwrócił się on w kierunku optyki i poświęcił się jej równie wyłącznie, jak wszystkiemu, co robił. Z książeczki rachunkowej Newtona z roku 1667 widać, że kupował on wtedy soczewki, pryzmaty, oraz proszek do polerowania szkła. Pomimo najdokładniejszych przyrządów, obrazy w świetle białem nie były absolutnie ostre. Fakt ten nasunął Newton'owi myśl twórczą, że przyczyna tego zjawiska nie zależy od przyrządów optycznych, lecz od samej natury światła białego, że światło białe nie może być przez soczewkę skupione w jednym punkcie. Myśl ta doprowadziła Newton'a do wykrycia rozszczepienia światła[1]). W r. 1669 Newton otrzymał katedrę fizyki po Barrow'ie (który poświęcił się studjom teologicznym) i w ciągu lat następnych wykończył swą teorję rozszczepienia się światła. W r. 1671 przesłał Towarzystwu Królewskiemu (Royal Society) ulepszony teleskop własnej konstrukcji, w roku zaś 1672 mianowany został członkiem tegoż Towarzystwa i w tymże roku przysłał Towarzystwu rozprawę o rozszczepieniu światła, która została rozpatrzona i przyjęta przez komisję; w skład tej komisji wchodzili między innemi Boyle i Hooke. Wyniki prac Newton'a z dziedziny optyki zebrane są w dwóch dziełach „Optics" oraz „Lectiones opticae"[1]). Teorja emisyjna światła, którą Newton, jakkolwiek z zastrzeżeniami, rozwija w swoich dziełach, doprowadza go do ostrego starcia z Hooke'iem, zwolennikiem teorji falowej. Starcie to tak dotknęło Newtona, który nadewszystko cenił spokój, iż postanowił on za życia Hooke'a nic nie ogłaszać z dziedziny optyki.

W r. 1682 Picard dokonał dokładniejszego pomiaru promienia ziem-

---

[1]) p. dział Optyki.

skiego. Wówczas — po piętnastu latach — wraca Newton do swych dawnych wyliczeń, które miały wykazać, że siła ciężkości jest tylko szczególnym przejawem wszechogarniającej siły ciążenia powszechnego.

Bieg jego rozumowania był następujący: Twierdzenie: Ciało porusza się po elipsie lub kole pod wpływem stałej siły dośrodkowej, jeśli przyśpieszenie przez nią wywołane i skierowane ku środkowi ruchu dodaje się do ruchu jednostajnego i prostolinijnego, wynikającego z bezwładności ciała. Zjawisko naturalne: Księżyc opisuje koło, w środku którego znajduje się ziemia. Wniosek: Księżyc porusza się pod wpływem siły dośrodkowej, wywieranej przez ziemię. Hipoteza: Ta siła dośrodkowa identyczna jest z ciężkością, pod wpływem której ciała spadają na ziemię; natężenie ciężkości maleje w odwrotnym stosunku do kwadratu odległości. Sprawdzenie hipotezy: Jeśli hipoteza ta się sprawdza, to przyśpieszenie księżyca, wyliczone na podstawie obserwacyj, dotyczących kształtu toru oraz czasu obiegu księżyca, powinno równać się przyśpieszeniu ciał spadających na ziemi, podzielonemu przez 60^2. (Odległość księżyca od ziemi równa się 60 promieniom ziemskim). Zjawiska analogiczne: Planety i ziemia poruszają się dokoła słońca podobnie, jak księżyc dokoła ziemi. Regula philosophandi: Jednorodnym działaniom należy przypisywać te same przyczyny. Uogólnienie hipotezy: Pod wpływem tej samej siły, ziemia i planety obracają się dokoła słońca. Siła ta rządzi ruchem wszystkich ciał niebieskich. Działa ona pomiędzy każdemi dwiema cząstkami materjalnemi, które przyciągają się odwrotnie proporcjonalnie do kwadratów odległości i wprost proporcjonalnie do mas. Siłę tę nazwać można przeto siłą ciążenia powszechnego.

Gdy wyliczenia, mające sprawdzić zasadę Newton'a, dobiegały do końca, uczuł się on tak wzruszonym, że dokończenie ich pozostawił przyjaciołom. Hipoteza Newton'a w wyliczeniach tych znalazła potwierdzenie.

Materjałem dowodowym dla idei Newton'a były więc zjawiska, odbywające się na niebie, wymierzone dokładnie przez astronoma Tycho de Brahe, oświetlone przez myśl Kopernika, ujęte w system w prawach Kepplera. Materjał ten dała mu historja, dała epoka, w której żył. A genjusz jego, ten czynnik twórczy a nieobliczalny, zdołał z materjału tego wznieść wielki system układu świata.

„Newton'owi danem było — pisze Laplace [1]) — zapoznać nas

[1]) Laplace „Exposition du Système du Monde", L. V, ch. V.

z ogólną zasadą ruchów niebieskich. Natura, obdarzając go głębokim genjuszem, postarała się ponadto umieścić go w najbardziej pomyślnej epoce. Kartezjusz zmienił oblicze nauk matematycznych przez obfite zastosowanie algebry do teorji krzywych i funkcji zmiennych. Fermat założył podstawy geometrji nieskończoności przez swoją piękną metodę maximów i minimów oraz stycznych. Wallis, Wren i Huygens odkryli właśnie prawa ruchu; odkrycia Galileusza, dotyczące spadania ciał ciężkich, oraz Huygensa o powłóczących i o sile odśrodkowej prowadziły do teorji ruchu krzywolinjowego. Keppler określił kształt toru planet i przewidział ciążenie powszechne, wreszcie Hook widział jasno, że ruchy ich są wypadkową pierwotnej siły rzutu i siły przyciągającej słońca. Do rozkwitu mechaniki wielce potrzebny był genjusz człowieka, który z uogólnienia tych odkryć potrafiłby wyprowadzić prawo ciążenia. To właśnie wykonał Newton w swojem nieśmiertelnem dziele „Zasady matematyczne filozofji przyrody".

W epoce tej Newton był całkowicie pogrążony w świecie myśli. Rzeczywistość materjalna niemal dla niego nie istniała. Zapominał o posiłku, nie istniała dlań noc, którą spędzał nieraz, siedząc rozebrany na krawędzi łóżka, nie istnieli przyjaciele, mimo których przechodził, jak lunatyk. W roku 1686 przesłał Królewskiemu Towarzystwu wykończony rękopis swego największego dzieła „Philosophiae Naturalis Principia mathematica". Wkrótce potem zapadł na chorobę psychiczną; nawet jego potężny intellekt nie zniósł tak nadmiernego wysiłku.

„Principia" składają się z trzech ksiąg i ze wstępu. Stanowią one całkowity traktat fizyki teoretycznej. Wstęp zawiera pierwsze ujęcie w system zasad dynamiki. Starożytni zajmowali się niemal wyłącznie statyką. Galileusz badał przyśpieszenie ciał pod wpływem ciężkości, znanem mu było również prawo bezwładności. Huygensa zajmował ruch kołowy. Newton w swoich „Leges motus" ujmuje zasady dynamiczne w system i do dziś służą one za podstawę dynamiki. Pierwsze prawo ruchu, czyli zasada bezwładności orzeka o stanie ciała, wyjętego z pod działania siły. Zasada ta była już znana Galileuszowi; starożytni sądzili, że wszelkiemu ruchowi towarzyszy działanie siły. Drugie prawo ruchu orzeka o następstwach działania sił oraz o ich mierzeniu. Wreszcie trzecie prawo ruchu głosi, że źródłem siły jest zawsze jakieś ciało, i że siły w przyrodzie występują zawsze parami, jako siły równe, skierowane odwrotnie i działające na dwa ciała różne. Księga pierwsza „Principiów", prócz rozdziału

przygotowawczego, zawierającego wykład metody granic stosunków geometrycznych, obejmuje twierdzenia, sprowadzające ruch po przecięciach stożkowych (kole, elipsie, hiperboli, paraboli) do siły dośrodkowej, odwrotnie proporcjonalnej do kwadratu odległości; dalsze rozdziały dotyczą przecięć stożkowych, prostolinijnego wznoszenia się i spadania ciał przy rozmaitym rodzaju sił przyciągających, wahadła i t. d. Ostatni rozdział dotyczy ruchu ciał bardzo drobnych i ma związek z teorją emisyjną światła. Księga druga zawiera rozważania nad ruchem ciał w ośrodku przedstawiającym opór, oraz wykład hydrostatyki. W rozdziale ósmym jest mowa o zjawiskach akustycznych, w ostatnim zaś o ruchach wirowych ciał ciekłych. W rozdziale tym Newton zbija poglądy Kartezjusza, który działania między planetami wyjaśnia wirami w ośrodku eterycznym.

Księga trzecia nosi tytuł „O układzie świata" i zawiera wykład zasady ciążenia powszechnego. W wywodach swoich Newton powołuje się: 1) na zjawiska ujęte w prawach Kepplera; 2) na twierdzenia, dotyczące siły dośrodkowej, udowodnione w rozdziałach pierwszych księgi pierwszej i 3) na prawidła, wytyczne w badaniach naukowo-przyrodniczych (regulae philosophandi), które umieszcza na czele księgi trzeciej.

Sama idea ciążenia nie była nową; zaczątki jej znajdujemy już w dziełach Kopernika, była poruszaną niejednokrotnie w w. XVII, ze współczesnych zaś Newton'owi uczonych, myśl tę rozważali Halley i Hooke. Zasługą genjuszu Newton'a było utożsamienie przyciągania działającego pomiędzy ciałami niebieskiemi z siłą ciężkości, oraz ścisłe obliczenia matematyczne, które tożsamości tej dowiodły. Zasługi tej nie chciał uznać Hooke, i po raz drugi ostro wystąpił przeciw Newton'owi, zarzucając mu plagiat.

Wobec nieuzasadnionych pretensyj roszczącego sobie wszędzie prawo do pierwszeństwa Hooke'a [1]), Newton wykazał zbytnią drażliwość. Miał on wstręt do sporów i dyskusyj, i obawa przed niemi była w stanie powstrzymać go od ogłoszenia dzieła, pomimo, że nie był on obojętnym na wyrazy uznania. Grawitacja nie u wszystkich znalazła uznanie . Jego myśl działania na odległość (actio in distans) była w sprzeczności z mechaniką kartezjańską, a siła przyciągania „właściwa" wszystkim ciałom przypominała nieco perypatetyczne „własności ukryte". Zachodzi tu jednak ta różnica, że własności ukryte uważane były za ostateczną, istotną przyczynę zjawisk. Newton

---

[1]) p. życiorys Hooke'a w dziale Optyki.

zaś „hipotez nie wymyślał", a prawo ciążenia powszechnego uważał za wyraz matematyczny stosunków zaobserwowanych.

Ogłoszenie „Principiów" zapewniło Newton'owi sławę za życia, zaszczyty oraz pieniądze. W r. 1695 zostaje on mianowany inspektorem, a następnie w r. 1699 dyrektorem mennicy z płacą 750 funtów rocznie. W r. 1699 Paryska Akademja Umiejętności mianowała go swym członkiem, a w 1675 Londyńskie Towarzystwo Królewskie swoim prezesem (godność tę piastował Newton aż do śmierci). W r. 1708 królowa Anna nadała mu tytuł szlachecki. Lecz działalność naukowa Newton'a nie jest już płodną, prawdopodobnie wskutek choroby psychicznej w r. 1693. Newton umarł w r. 1724 w wieku lat 80 i został pochowany z wielką uroczystością w opactwie Westminsterskiem.

Całe życie Newton'a poświęcone było wyłącznie nauce. Nie był on żonaty; dom prowadziła siostrzenica jego, która mieszkała przy nim wraz ze swym mężem. Od niej pochodzą szczegóły, dotyczące jego życia prywatnego. Newton był człowiekiem głęboko religijnym, odznaczał się przytem tolerancją względem innych. Był to człowiek godny, spokojny, pełen prostoty; spory i dyskusje były największą plagą jego życia. Lubił on w ciszy i samotności obcować z wielkiemi prawdami. Każdej pracy swojej, każdej myśli oddawał się wytrwale i z całą wyłącznością, i w tem tkwi przyczyna płodności jego genjuszu. Na zapytanie, jak dochodzi do swych odkryć, miał on odpowiedzieć: „Przez nieustanne myślenie o nich. Przedmiot mam ciągle przed sobą i czekam zanim pierwsze brzaski nie zamienią się powoli i stopniowo w zupełną jasność. Jeśli przyniosłem ogółowi pewną korzyść, to tylko dzięki pracowitości i cierpliwemu myśleniu".

Matematyczne zasady filozofji natury[1]).

Określenia.

Określenie I. Ilość materji należy mierzyć jednocześnie gęstością i objętością ciała (to znaczy: iloczynem z gęstości przez objętość).

W podwójnej przestrzeni przy podwójnej gęstości znajduje się

[1]) „Philosophiae Naturalis Principia Mathematica" (1687). Tłumaczenie niniejsze dokonane zostało z przekładu niemieckiego Dr. J. Ph. Wolfers'a (1872); przekład ten był porównywany z francuskim przekładem E. Jouguet'a („Lectures de Mécanique", Paris 1908).

cztery razy większa ilość powietrza, w potrójnej zaś przestrzeni — sześć razy większa... Tę ilość materji nazywać będę w dalszym ciągu ciałem lub masą; poznajemy ją z ciężaru ciała. Przekonałem się bowiem zapomocą bardzo dokładnych doświadczeń z wahadłami, że masa ciała jest proporcjonalna do ciężaru jego.

Określenie II. Ilość ruchu należy mierzyć iloczynem z masy przez prędkość.

Ruch całości jest sumą ruchów poszczególnych części. Ilość jego jest więc dwa razy większą w ciele dwa razy większem przy tej samej prędkości i cztery razy większa w ciele dwa razy większem przy prędkości zdwojonej.

Określenie III. Materja posiada zdolność stawiania oporu, dlatego każde ciało pozostaje samo przez się w stanie spoczynku lub ruchu prostolinjowego i jednostajnego.

Określenie IV. Siła przyłożona jest to działanie, skierowane ku zmianie stanu ciała, czy to stanu spoczynku, czy to ruchu prostolinjowego i jednostajnego, w którym się ciało znajduje.

Siła ta polega li tylko na działaniu i nie pozostaje w ciele, skoro działanie ustanie, lecz ciało trwa w tym nowym stanie tylko dzięki działaniu siły bezwładności. Siła przyłożona może pochodzić z różnych źródeł, jak np. z uderzenia, ciśnienia, siły dośrodkowej.

Określenie V. Siła dośrodkowa jest to siła, która każe ciałom dążyć do pewnego punktu, jako do środka, działając przez przyciąganie, popychanie lub jakimkolwiek innym sposobem.

Ciążenie, które sprawia, że ciała dążą ku środkowi ziemi, siła magnetyczna, która sprawia, że żelazo dąży do magnesu, i ta jakaś siła, która odciąga nieustannie planety od ich ruchu prostolinjowego i która każe im krążyć po krzywych — wszystko to są siły tego rodzaju.

Kamień obracany w procy ma dążność do oddalenia się od obracającej go ręki; wypręża on przez to swe dążenie procę, — tem silniej, im szybszym jest ruch obrotowy, i kamień odlatuje, skoro tylko go się wypuści. Siła ręki, przytrzymująca kamień, równa i przeciwna sile, którą kamień wypręża procę, a więc stale skierowana ku ręce — środkowi opisywanego koła, jest właśnie siłą, którą nazywam siłą

dośrodkową. To samo ma miejsce w stosunku do wszystkich ciał, poruszających się po kołach. Wszystkie one mają dążność do oddalania się od środka ich obrotu i gdyby nie działanie jakiejś siły, która sprzeciwia się temu dążeniu i która zatrzymuje je na orbitach, to jest jakiejś siły dośrodkowej, oddaliłyby się one po linji prostej ruchem jednostajnym.

Pocisk nie spadłby z powrotem na ziemię, gdyby nie działała nań siła ciężkości, lecz oddalałby się w przestrzenie niebieskie ruchem jednostajnym i prostolinjowym, gdyby przytem opór powietrza nie istniał. A więc przez siłę ciężkości jest ciało odciągane od kierunku prostolinjowego i naginane nieustannie ku ziemi; jest ono odciągane mniej lub więcej, zależnie od ciężkości i od prędkości jego ruchu. Im mniejszym będzie jego ciężar w stosunku do ilości materji, im większą — prędkość, z którą zostało rzucone, tem mniej zboczy ono od kierunku prostolinjowego i tem dalej pójdzie, zanim spadnie na ziemię.

Gdyby kula armatnia została wystrzelona poziomo z wierzchołka góry z prędkością, którąby pozwoliła jej przebiec dwie mile przed spadnięciem na ziemię, to przy prędkości początkowej zdwojonej upadłaby ona na ziemię dopiero po przebyciu czterech mil, zaś przy prędkości dziesięciokrotnej przebiegłaby dziesięć razy dalej (o ile nie weźmiemy pod uwagę oporu powietrza). Tak więc, zwiększając prędkość ciała, możnaby było zwiększać dowolnie drogę, którą przebywa ona przed spadnięciem na ziemię i zmniejszać krzywiznę toru, który ono opisuje. Mogłoby więc ono spaść na ziemię dopiero w odległości 10°, 30° lub 90°, lub wreszcie mogłoby ono obiegać wkoło ziemię, nigdy nie spadając, lub nawet oddalić się po linji prostej w nieskończone przestrzenie niebieskie.

Otóż na tej samej zasadzie, podług której pocisk mógłby się obracać dokoła ziemi działaniem siły ciężkości, możliwem jest, że księżyc wskutek siły ciężkości (jeśli jej podlega) lub wskutek innej siły, która skierowuje go ku ziemi, jest ustawicznie ściągany z kierunku prostolinjowego, przybliżany do ziemi i zmuszany do obiegu po krzywej, i bez podobnej siły księżyc nie mógłby być utrzymywany na swej orbicie.

Gdyby siła ta była odpowiednio mniejsza, nie odciągałaby ona dostatecznie księżyca od linji prostej; gdyby zaś była większa, odciągałaby go zbyt mocno i ciągnęłaby go z jego orbity w kierunku ku ziemi. Siła ta więc powinna być wielkości określonej i zadaniem matematyków jest znaleźć wielkość siły, gdy daną jest orbita krążącego

ciała, lub odwrotnie: określić krzywą, którą powinno zakreślić ciało, poruszające się pod wpływem danej siły dośrodkowej i wychodzące z danego punktu z daną prędkością

Pewniki czyli prawa ruchu[1].

Prawo I. Każde ciało trwa w swym stanie spoczynku lub ruchu prostolinjowego i jednostajnego, jeśli siły przyłożone nie zmuszają ciała do zmiany tego stanu.

[Lex I. Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum nisi quatenus illud a viribus impressis cogitur statum suum mutare].

Pociski trwają same przez się w swoim ruchu, o ile prędkość ich nie zostanie zmniejszona przez opór powietrza, oraz, o ile kierunek ich nie ulegnie zmianie wskutek siły ciężkości. Bąk, którego części wskutek siły spójności zbaczają bezustannie z kierunku prostolinjowego, przestaje się obracać tylko wskutek oporu powietrza, hamującego stopniowo jego bieg. Planety zaś i komety, które posiadają większą masę i poruszają się w ośrodku, przedstawiającym mniejszy opór, zachowują dłużej ruch postępowy oraz obrotowy.

Prawo II. Zmiana ruchu jest proporcjonalna do przyłożonej siły poruszającej i odbywa się w kierunku prostej, wzdłuż której siła jest przyłożona.

[Lex II. Mutationem motus proportionalem esse vi motrici impressae, et fieri secundum lineam rectam qua vis illa imprimitur].

Jeśli pewna siła wywołuje pewien ruch, siła dwa razy większa wywoła ruch dwa razy większy, siła trzy razy większa wywoła ruch trzy razy większy i t. d., bez względu na to, czy te siły działają jednocześnie, naraz czy stopniowo i kolejno po sobie. Ponieważ ruch jest skierowany zawsze w tym samym kierunku, jak siła, przeto, gdy ciało już przed działaniem siły znajdowało się w ruchu, ruch, wywołany przez tę siłę, dodaje się do poprzedniego, gdy kierunki ich są zgodne, lub też zostaje złożony z poprzednim, stosownie do kierunku obu, gdy kierunki ich zawierają pewien kąt.

---

[1]) „Axiomata sive leges motus". Prawa ruchu podajemy w tłumaczeniu prof. Wł. Natansona, wyjętem ze „Wstępu do Fizyki teoretycznej", str. 28.

Prawo III. Względem każdego działania istnieje przeciwdziałanie, skierowane przeciwnie i równe; t. j. wzajemne działania dwóch ciał są zawsze równe sobie i skierowane przeciwnie.

[Lex III. Actioni contrariam semper et aequalem esse reactionem: sive corporum duorum actiones in se mutuo semper esse aequales et in partes contrarias dirigi].

Każde ciało, które ciśnie na inne ciało lub je ciągnie, jest tą samą siłą przez to inne ciało ściskane lub ciągnione. Jeśli ktoś naciska palcem kamień, kamień jednocześnie ciśnie na palec. Jeśli koń ciągnie zapomocą sznura kamień, jest on również przez kamień ciągniony, gdyż sznur, który ich łączy i który jest napięty z dwóch stron, dąży w równej mierze do przyciągnięcia konia do kamienia, jak i kamienia do konia, i dążenie to o tyleż przeciwstawia się ruchowi jednego, o ile wywołuje ruch drugiego.

Jeśli ciało uderza inne ciało i jeśli wskutek tego ruch jego ulegnie jakiejś zmianie, ruch ciała uderzającego zmieni się o tę samą ilość i w kierunku przeciwnym przez siłę, pochodzącą od ciała uderzonego wskutek równości ciśnienia, jakie te ciała wzajemnie na się wywierają.

Wskutek tych działań wzajemnych następują równe zmiany nie prędkości, lecz [ilości] ruchu, o ile bieg zjawisk nie jest zakłócony przez żadne zjawisko uboczne, gdyż zmiany prędkości, które odbywają się w kierunkach przeciwnych, powinny być odwrotnie proporcjonalne do mas, albowiem zmiany ilości ruchu są sobie równe. Prawo to dotyczy również przyciągania.

O układzie świata.

KSIĘGA TRZECIA.

W poprzednich księgach przedstawiłem zasady Nauki o Przyrodzie, nie fizyczne jednak, lecz tylko matematyczne, z których można również wyciągać wnioski w badaniach fizycznych. Są to prawa i warunki ruchów i sił, które dotyczą głównie Nauki o Przyrodzie. Aby się jednak nie wydawały one bezpłodnemi, opatrzyłem je pewnemi fizycznemi wyjaśnieniami, w których poruszałem to, co ogólnie i głównie zdaje się stanowić podstawę fizyki, jako - to: gęstość i opór ciał, przestrzenie wolne od ciał, ruch światła i głosu. Pozostaje jeszcze poznać na podstawie tych zasad urządzenie świata.

Z tej racji księgę trzecią miałem napisaną w sposób popularny,

aby mogła być ona czytana przez wielu. Ci jednak, którzy nie zgłębili dostatecznie poprzedzających zasad, nie pojęliby siły dowodzeń i nie pozbyliby się uprzedzeń, do których przywykli od lat wielu. Z tego względu, aby rzecz nie została wciągnięta w wir sporów, ująłem treść tej książki, zwyczajem matematyków, w formę twierdzeń, aby były one tylko przez tych czytane, którzy poprzednio zgłębili „zasady". Ponieważ jednak spotkać tam można wiele twierdzeń, które zatrzymałyby zbyt długo nawet czytelników biegłych w matematyce, nie chcę przeto zmuszać nikogo do przerabiania wszystkiego. Powinnoby wystarczyć uważne przeczytanie określeń, praw ruchu oraz trzech pierwszych rozdziałów księgi pierwszej, następnie możnaby przejść do księgi niniejszej o układzie świata, odszukując, stosownie do potrzeby, inne cytowane tu twierdzenia ksiąg poprzednich.

Prawidła badania natury [1]).

Prawidło I. Nie należy dla wytłumaczenia zjawisk natury przypuszczać przyczyn więcej, niż potrzeba, aby zjawiska dane wytłumaczyć i — tylko prawdziwe.

Fizycy powiadają: W przyrodzie nie dzieje się nic zbytecznego, zbytecznem zaś jest to, co się dzieje przez dużo przyczyn, a przez mniej staćby się mogło. Gdyż prostą jest przyroda i nie szafuje rozrzutnie nadmiarem przyczyn. [Por. z wstępem z Kopernika na str. 31].

Prawidło II. Trzeba zatem, o ile możności, jednorodnym działaniom przypisywać te same przyczyny. A więc oddychaniu ludzi i zwierząt, spadkowi kamieni w Europie i w Ameryce, światłu ognia kuchennego i światłu słońca, odbijaniu się światła na ziemi i na planetach.

Prawidło III. Te własności ciał, które nie mogą być ani powiększone, ani zmniejszone i przypadają w udziale wszystkim ciałom, które doświadczalnie zbadane być mogą, uważać należy za ogólne własności ciał.

Własności ciał bowiem poznajemy tylko przez doświadczenie, przeto za ogólne należy uważać te, które naogół zgodne są z doświadczeniem i które nie mogą być ani zmniejszone, ani zniesione. Nie należy oczywiście stwarzać sprzecznych z doświadczeniem urojeń ani też oddalać się od podobieństwa do natury, która jest prosta i zawsze ze sobą zgodna.

---

[1]) „Regulae philosophandi".

Prawidło IV. W fizyce doświadczalnej za ścisłe lub w przybliżeniu prawdziwe należy uważać twierdzenia, wysnute ze zjawisk drogą indukcji, dopóki nie zajdą zjawiska inne, przez które twierdzenia te zostaną jeszcze mocniej ugruntowane lub poddane wyjątkom. Tak dziać się powinno, aby hipotezy nie niszczyły argumentów indukcji.

Zjawiska.

Zjawisko pierwsze. Księżyce Jowisza zakreślają przy pomocy promieni wodzących, poprowadzonych do środka Jowisza, powierzchnie proporcjonalne do czasów. Stosunek czasów obiegu ich stanowi $^3/_2$ stosunku ich odległości od tego środka. [Stosunek $^3/_2$ dotyczy wykładników]. Wynika to z obserwacyj astronomicznych. Tory tych księżyców nie odbiegają zbytnio od kół, koncentrycznych w stosunku do Jowisza, i ruchy ich po tych kołach są jednostajne...

Dalej następują dane liczbowe, dotyczące elementów toru.

W „zjawisku drugiem" N. przytacza analogiczne spostrzeżenia, dotyczące księżyców Saturna.

Zjawisko trzecie. Pięć planet: Merkury, Wenus, Mars, Jowisz i Saturn obejmują swymi torami słońce. Że Merkury i Wenus poruszają się dokoła słońca — widać to z ich faz podobnych do faz księżyca. Świecąc całym blaskiem, znajdują się one po tamtej stronie słońca, świecąc połową blasku, znajdują się w środku; zaś po tej stronie od słońca mają kształt sierpa lub też ciemnych plam przechodzących przez tarczę słońca. Dalej z pełnego światła Marsa w pobliżu konjunkcji słońca i z rogatego wyglądu jego w pobliżu kwadratur wywnioskowano z pewnością, iż obraca się on około słońca. O Jowiszu i Saturnie dowodzi się tego samego na podstawie ich stale pełnego światła; to, że błyszczą one jedynie światłem pożyczanem od słońca, wynika z cieniów rzucanych na nie przez ich księżyce.

Zjawisko czwarte. Czasy obiegu pięciu planet dokoła słońca, oraz czas obiegu słońca dokoła ziemi lub ziemi dokoła słońca, są do siebie w stosunku równym $^3/_2$ stosunku ich średnich odległości od słońca [stosunek $^3/_2$ dotyczy wykładników]. Stosunek ten, znaleziony przez Kepplera, nie ulega wątpliwości u wszystkich planet...

Zjawisko piąte. Powierzchnie, zakreślane przez promienie wodzące, poprowadzone od planet do ziemi, nie są proporcjonalne do czasów, natomiast powierzchnie, opisywane przez promienie wodzące, poprowadzone od planet do słońca, są proporcjonalne do czasów.

Z j a w i s k o s z ó s t e. Księżyc zakreśla przy pomocy promienia wodzącego, przeprowadzonego do ziemi, powierzchnie proporcjonalne do czasu... Ruchy księżyca zakłóca nieco siła słońca; te znikomo małe błędy pomijam przy zjawiskach.

ROZDZIAŁ I.

O przyczynach budowy świata.

§ 1. T w i e r d z e n i e. Siły, przez które księżyce Jowisza są stale odciągane od biegu prostolinjowego i utrzymywane na swych orbitach, są skierowane ku środkowi Jowisza i odwrotnie proporcjonalne do kwadratów ich odległości od tego punktu.

Pierwsza część tego twierdzenia wynika ze Zjawiska pierwszego i z § 14 lub § 16 księgi pierwszej, następna część wynika z tegoż zjawiska oraz z § 18 tamtej księgi.

To samo dla księżyców Saturna wynika ze zjawiska drugiego.

[§ 14 księgi pierwszej zawiera dowód twierdzenia następującego: Każde ciało, które porusza się po jakiejkolwiek krzywej, której promienie są zwrócone do jakiegoś punktu, bądź znajdującego się w spoczynku, bądź w ruchu jednostajnym i prostolinjowym, i zakreśla promieniami tymi przestrzenie proporcjonalne do czasów, poddane jest działaniu siły dośrodkowej, do tego punktu skierowanej.

§ 18 księgi pierwszej zawiera dowód twierdzenia następującego: Siły dośrodkowe, działające na takie ciała, które opisują różne koła ruchem jednostajnym, są skierowane ku środkowi kół tych i są wprost proporcjonalne do kwadratów łuków, zakreślonych ruchem jednostajnym, i odwrotnie proporcjonalne do promieni].

§ 2. T w i e r d z e n i e. Siły, przez które planety są stale odciągane od ruchu prostolinjowego i utrzymywane na swych orbitach, są skierowane ku słońcu i odwrotnie proporcjonalne do kwadratów ich odległości od niego.

Pierwsza część tego twierdzenia wynika ze zjawiska piątego i z § 14 księgi pierwszej, część następna wynika ze zjawiska czwartego.

§ 3. T w i e r d z e n i e. Siła, która utrzymuje księżyc na torze jego, jest skierowana ku ziemi i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości jego od środka ziemi.

Pierwsza część tego twierdzenia znajduje swe wyjaśnienie w zjawisku szóstem i § 14 lub § 16 księgi pierwszej...

D o p e ł n i e n i e. Jeśli średnią siłę dośrodkową, która utrzymuje księżyc na jego torze, powiększymy z początku w stosunku

177,725 : 178,725; następnie również w podwójnym stosunku [ma to znaczyć w stosunku do kwadratu] promienia ziemi do średniej odległości środka księżyca od środka ziemi, to otrzymamy siłę dośrodkową, która działałaby na księżyc na powierzchni ziemi, w tem założeniu, że siła ta przy zbliżaniu się do powierzchni ziemi rośnie stale odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości.

§ 4. Twierdzenie. Księżyc jest ciężki względem ziemi, jest on przez siłę ciężkości odciągany od ruchu prostolinjowego i utrzymywany na swoim torze.

...Przyjmijmy, jak to podają astronomowie, średnią odległość księżyca od ziemi równą 60 promieniom tejże, zaś syderyczny czas obiegu księżyca = 27 dniom 7 godz. 43 min. Jeśli dalej obwód ziemi, zgodnie z pomiarami Francuzów, przyjmiemy równym 12329600 stopom paryskim i pomyślimy, iż księżyc jest pozbawiony wszelkiego ruchu i całą siłą, którą jest on (na podstawie dopełnienia § 3) utrzymywany na swym torze, spuszcza się ku ziemi, to w ciągu minuty przejdzie on drogę równą $15^1/_{12}$ stopy paryskiej lub dokładniej: 15 stóp 1 cal i $1^4/_9$ linji miary paryskiej.

[Stopa paryska = 0,32485 metra, 1 cal par. = 0,0270707 metra, 1 linja = 0,0022559 metra. Stopa = 12 calom = 144 linjom].

Ponieważ siła ta przy przybliżaniu się ziemi wzrasta w stosunku odwrotnie proporcjonalnym do kwadratu odległości, i zgodnie z tem na powierzchni ziemi jest 60 . 60 większa, niż przy księżycu; przeto ciało, spadające w naszych okolicach, wskutek tej siły, musiałoby przechodzić w ciągu minuty drogę równą 60 . 60 . $15^1/_{12}$ stopy, zaś w ciągu sekundy — $15^1/_2$ stopy, czyli dokładniej — 15 stóp 1 cal $1^4/_9$ linji miary paryskiej.

I rzeczywiście ciała na ziemi spadają pod działaniem tej siły. Według Huygensa mianowicie, wynosi długość wahadła, które w szerokości Paryża wybija sekundy, 3 stopy 8,5 linji miary paryskiej.

Wysokość, którą zakreśla ciężkie ciało, spadające w ciągu sekundy, ma się do połowy długości wahadła w stosunku podwójnym [czyli w stosunku do kwadratu] obwodu koła do średnicy (według Huygensa), jest ona więc równą 15 stopom 1 calowi i $1^7/_9$ linjom. Siła więc, przez którą księżyc zostaje utrzymany na swym torze, jest, jak z tego wynika, równa naszej sile ciężkości i zgodnie z tem (według prawidła 1-go i 2-go) jest tą samą siłą właśnie, którą nazywamy ciężkością...

[Rozumowanie Newton'a da się ująć w sposób następujący przy pomocy dobrze dziś znanych wzorów:

Przyśpieszenie w ruchu jednostajnym po kole obliczamy zapomocą wzoru:

$$a = \frac{4\pi^2 R}{T^2};$$

stosując ten wzór do obrotu księżyca dokoła ziemi i oznaczając przez r promień kuli ziemskiej, przez R średnią odległość księżyca od ziemi i biorąc $T = 27$ dniom 7 godz. 43 min. $=$ 39343 min., otrzymamy ($R = 60r$):

$$a = \frac{2\pi \times 2\pi r \times 60}{T^2} = \frac{2\pi \times 123249600 \times 60}{39343^2} = 30.023 \frac{\text{stopa.}}{\text{min.}^2}$$

Przyśpieszenia tego doznaje księżyc pod wpływem działania siły wypadkowej, składającej się z przyciągana ziemi i z przyciągania słońca; przyśpieszenie, wywołane przez przyciąganie ziemskie, jest większe w stosunku

$$\frac{178.725}{177.725}, \text{ czyli } a' = \frac{30.023 \times 178.725}{177.725} = 30.192 \frac{\text{stopa}}{\text{min.}^2}$$

Drogę, przebytą ruchem jednostajnie przyśpieszonym, obliczamy podług wzoru:

$$s = {}^1/_2 a t^2; \text{ dla } t = 1,\ s = {}^1/_2 a.$$

Stąd droga przebyta w ciągu minuty

$$s = \frac{30.192}{2} = 15.096 \text{ stopy.}$$

Gdyby księżyc znajdował się na powierzchni ziemi, to i przyśpieszenie i droga byłyby 60^2 razy większe, a więc księżyc przebywałby $60^2 \times 15.096$ stopy na minutę, czyli *15.096 stopy* na sekundę.

Z drugiej strony możemy wyznaczyć przyśpieszenie ziemskie z wzoru na czas drgania wahadła. Wiadomo, że oznaczając przez T czas drgania wahadła, przez l — jego długość i przez g — przyśpieszenie ziemskie, otrzymujemy, iż

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Podług Huygensa, dla $T = 1$ sek, długość wahadła l wynosi 3 stopy 8.5 linji $=$ $=$3.059 stopy, a więc

$$1 = \pi^2 \frac{l}{g};\ g = \pi^2 l.$$

Droga prebyta w ciągu sekundy

$$s = {}^1/_2 g = {}^1/_2 \pi^2 l = {}^1/_2 \pi^2 \times 3.059 = 15{,}055 \text{ stopy}].$$

§ 6. Twierdzenie. Księżyce Jowisza ciążą ku Jowiszowi, księżyce Saturna — ku Saturnowi, planety — ku słońcu i są ciągle przez siłę ciężkości odciągane od ruchu prostolinjowego i utrzymywane na torze krzywolinjowym. Ruchy księżyców Jowisza dokoła Jowisza, Saturna — dokoła Saturna, ruchy Merkurego, Wenery i re-

szty planet dokoła słońca — są zjawiskami tego samego rodzaju, zależą więc (według prawidła drugiego) od przyczyn tego samego rodzaju; zwłaszcza ponieważ zostało wykazanem, iż siły, od których ruchy zależą, są skierowane ku środkowi Jowisza, Saturna i słońca i z oddaleniem od tych środków zmniejszają się w tym samym stosunku i według tego samego prawa, co siła ciężkości przy oddalaniu się od ziemi.

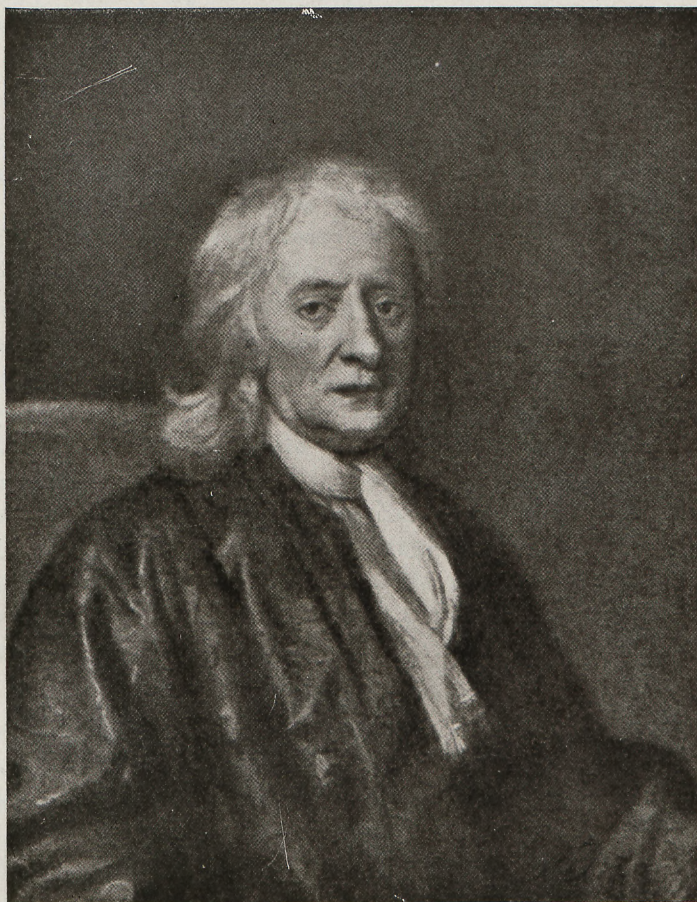
D o p e ł n i e n i e I. Ciężkość działa więc na wszystkie planety i na wszystkie księżyce... Ponieważ jednak wszelkie przyciąganie, według 3 prawa ruchu, jest wzajemne, przeto Jowisz ciąży ku wszystkim swoim księżycom, Saturn — ku swoim, ziemia ku księżycowi, słońce zaś ku wszystkim planetom.

D o p e ł n i e n i e II. Siła ciężkości, skierowana ku każdej poszczególnej planecie, jest odwrotnie proporcjonalna względem kwadratu odległości każdego poszczególnego miejsca od środka planety.

D o p e ł n i e n i e III. Według dopełnienia 1-go i 2-go, wszystkie planety ciążą ku sobie... i wyraźnie zakłócają wzajemnie swoje ruchy. Tak samo słońce zakłóca ruch księżyca, słońce i księżyc wpływają na nasze morze, jak to okażemy dalej.

§ 7. U w a g a. Dotychczas nazywaliśmy tę siłę, która utrzymuje ciała niebieskie na ich orbitach, — s i ł ą d o ś r o d k o w ą. To, że jest ona identyczna z siłą ciężkości, zostało udowodnione; będziemy ją więc odtąd nazywali c i ę ż k o ś c i ą. Albowiem przyczyna tej siły dośrodkowej, która utrzymuje księżyc na jego torze — może być rozszerzona, według prawidła 1, 2 i 4-go, na wszystkie planety.

§ 8. T w i e r d z e n i e. Wszystkie ciała ciążą ku poszczególnym planetom, i ciężary ich względem tych planet są przy równych odległościach od ich środków proporcjonalne do ilości zawartej w nich materji. To, że spadanie wszystkich ciał ciążących ku ziemi odbywa się w czasach równych (przynajmniej jeżeli pominąć niejednakowe opóźnienie, wynikające z nieznacznego zresztą oporu powietrza), spostrzegli już inni oddawna; równość czasów można najdokładniej zaobserwować przy pomocy wahadeł. Wykonywałem doświadczenia ze złotem, srebrem, ołowiem, szkłem, piaskiem, solą kuchenną, drzewem, wodą i pszenicą. Dla porównania używałem dwóch jednakowych pudełek. Jedno z nich napełniłem drzewem i powiesiłem kawałek złota tej samej wagi, jak mogłem najdokładniej, w środku ciężkości drugiego. Pudełka, wiszące na jednakowych nitkach, dłu-



ISAAC NEWTON

Wyd. „Mathesis Polska”.





gich na 11 stóp, tworzyły wahadła, które były dokładnie sobie równe pod względem kształtu i oporu powietrza, i umieszczone obok siebie, wahały się one w ciągu długiego czasu tam i napowrót jednakowo.

D o p e ł n i e n i e I. Ciężary ciał nie zależą więc od kształtu ich lub budowy. Gdyby się bowiem ciężary mogły zmieniać wraz z ich kształtem, to ciała stawałyby się to cięższe, to lżejsze, zależnie od różnych kształtów tej samej materji, co jest zupełnie sprzeczne z doświadczeniem.

D o p e ł n i e n i e II. Wszystkie ciała, które otaczają ziemię, są względem niej ciężkie, i ciężary ich są, jeśli się one znajdują w jednakowych odległościach od ziemi, proporcjonalne do ilości materji w każdem z nich. Zostało to doświadczalnie stwierdzone dla wszystkich ciał dostępnych, i, zgodnie z prawidłem trzeciem, można to twierdzić o wszystkich ciałach wogóle.

D o p e ł n i e n i e V. Ciężkość jest siłą innego rodzaju, niż siła magnetyczna; ta ostatnia nie jest bowiem proporcjonalna do ilości przyciąganej materji. Pewne ciała są przyciągane mocniej, inne słabiej; wiele ciał nie ulega wcale przyciąganiu magnesu. Magnetyczna siła tego samego ciała może być wzmożona lub zmniejszona; bywa ona niekiedy w stosunku do ilości materji o wiele większa, niż siła ciężkości. Z oddaleniem się od magnesu maleje ona nie w podwójnym, lecz niemal w potrójnym stosunku, o ile mogłem określić przy pomocy dość niedokładnych doświadczeń [czyli w stosunku nie do kwadratu, lecz do sześcianu].

§ 9. T w i e r d z e n i e. Ciężkość właściwa jest wszystkim ciałom i jest proporcjonalna do ilości materji, zawartej w każdem z nich. Wykazaliśmy wyżej, iż wszystkie planety ciążą ku sobie wzajemnie, że ciężkość względem danej z pomiędzy nich, którą się rozpatruje zosobna, jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości od jej środka ciężkości i że wskutek tego ciężkość we wszystkich planetach jest proporcjonalna do ilości ich materji. Nadto wszystkie części danej planety A ciążą ku jakiejkolwiek planecie B, i siła ciężkości, działającą na dowolną część, ma się do siły ciężkości, działającej na całość, tak, jak materja tej całości ma się do materji tej części. Wreszcie (według trzeciego prawa ruchu) akcja równa jest reakcji. Ze swej strony więc będzie planeta B ciążyć ku wszystkim częściom planety A, i ciążenie jej ku dowolnej części będzie się tak miało do ciążenia ku całej planecie, jak materja tej części do materji całej planety. C. b. d. d.

Dopełnienie I. Ciążenie więc ku całej planecie złożone jest z ciążenia ku wszystkim jej częściom... Jeśli ktokolwiek uczyni zarzut, iż, według tego prawa, wszystkie ciała na ziemi powinnyby ku sobie ciążyć i że to ciążenie wzajemne nie daje się przecież zauważyć, to odpowiem, iż to wzajemne ciążenie między ciałami ma się do ciążenia ku ziemi tak, jak masa pierwszych ma się do masy ostatniej. Przeto ciążenie wzajemne jest nazbyt słabe, aby mogło być spostrzeżonem.

Dopełnienie II. Ciążenie ku każdej równej cząstce ciała jest odwrotnie proporcjonalne do kwadratu odległości od tej cząsteczki.

Uwaga ogólna... Dotąd wyjaśniałem zapomocą siły ciężkości zjawiska dotyczące ciał niebieskich i ruchów morza, lecz nigdzie nie podałem przyczyny tej siły. Siła ta pochodzi od jakiejś przyczyny, która przenika aż do środka słońca i planet, nie tracąc nic ze swego działania. Nie działa ona w stosunku do powierzchni cząstek, na które oddziaływa (jak przyczyny mechaniczne), lecz w stosunku do ilości materji stałej, i działanie jej sięga na wszystkie strony, aż do odległości niezmiernych, przyczem maleje ona stale w odwrotnym stosunku do kwadratu odległości...

Nie doszedłem jeszcze do wykrycia na podstawie zjawisk przyczyny tych własności ciążenia, hipotez zaś nie wymyślam (hypotheses non fingo). Wszystko bowiem, co metafizyczne czy fizyczne, mechaniczne lub dotyczące własności ukrytych, nie powinno być przyjmowane w fizyce eksperymentalnej. W niej wyprowadza się twierdzenia ze zjawisk i uogólnia się je przez indukcję. W ten sposób poznaliśmy nieprzenikliwość, ruchliwość, zderzenie się ciał, prawa ruchu i ciężkości. Wystarcza, że ciężkość istnieje, że działa ona wedle praw wyżej wyłożonych i że można z jej pomocą wytłumaczyć wszystkie ruchy ciał niebieskich i morza...

LAPLACE.

(1749 — 1827).

Laplace, utalentowany matematyk i astronom, był propagatorem i współtwórcą mechaniki newtonjańskiej, zastosował on bowiem jej założenia do wyjaśnienia całego szeregu zjawisk niebieskich, ujmując je na podstawie tych założeń w jednolity system.

Pierre-Simon Laplace urodził się w Beaumont-sur-Auge

w departamencie Calwados. Ojciec jego był ubogim rolnikiem. Młody Laplace od dzieciństwa odznaczał się wielkiemi zdolnościami; po ukończeniu szkoły średniej i szkoły wojskowej w rodzinnem mieście, został tamże nauczycielem matematyki. Rozprawa jego „o rachunku całkowym", napisana w r. 1766-ym, zwraca na niego uwagę uczonych. Zostaje wezwany do Paryża, gdzie jego naukowe prace otwierają mu podwoje uczonych i możnych. W r. 1773 jest już członkiem Akademji Nauk. W następnych latach ogłasza szereg rozpraw o ruchach i kształtach ciał niebieskich.

Bierze czynny udział w rewolucji francuskiej, jest członkiem, następnie prezesem komisji miar i wag, opracowującej system metryczny, w r. 1799 wydaje pierwsze księgi swojej „Mechaniki nieba", zaś trzy lata przedtem jej wydanie bardziej popularne „Wykład o budowie świata". Napoleon mianuje go ministrem spraw wewnętrznych, następnie senatorem, wice-prezydentem senatu, wreszcie nadaje mu tytuł hrabiego. Laplace nie przerywa swych prac naukowych: w roku 1825 kończy „Mechanikę nieba" i wydaje parę prac z teorji prawdopodobieństwa. Po upadku Napoleona Laplace uznaje nowego władcę w osobie Ludwika XVIII-go, który mianuje go markizem i parem Francji. W r. 1816 wchodzi do Akademji Francuskiej Umiera w r. 1827.

Oprócz wymienionych prac matematycznych i astronomicznych, Laplace jest autorem kosmogonicznej teorji mgławic. Ze zjawisk fizycznych zajmował się on włoskowatością, ciśnieniem atmosfery, szybkością i załamaniem promieni świetlnych. Dzieła Laplace'a nietylko odznaczają się wykończeniem naukowem, lecz również noszą cechy talentu literackiego.

Wyjątki z dzieła „O budowie świata" [1]).

Przedmowa do księgi IV.

...Prawa mechaniki dają się najlepiej obserwować w przestworzach niebieskich. Na ziemi bowiem zjawiska mechaniczne komplikowane są przez tyle zjawisk ubocznych, że trudno jest je rozplątać, a jeszcze trudniej poddać rachunkowi. Ciała zaś, wchodzące w skład systemu słonecznego, rozdzielone przez olbrzymie przestrzenie i poddane działaniu jednej siły, której skutki łatwo dają się obliczyć,

[1]) „Exposition du Système du Monde", par M. le Comte de Laplace, quatrième edition. 1813.

doznają w swych ruchach wzajemnych tak małych zakłóceń, że można ująć w formuły ogólne wszystkie zmiany, które zachodzą i zachodzić będą w tym systemie. Mowa tu nie o przyczynach nieokreślonych, których nie można obliczyć i które wyobraźnia zmienia w sposób dowolny, aby wyjaśnić zjawisko, lecz o prawie ciążenia powszechnego. Ma ono tę własność, że może być poddane rachunkowi i że porównanie wyników teorji z danemi obserwacji daje najpewniejszy sposób stwierdzenia jego prawdziwości. Wielkie to prawo przyrody obejmuje, jak zobaczymy, wszystkie zjawiska niebieskie, aż do ich najmniejszych szczegółów, tak że niema ani jednej pozornej nieprawidłowości, którąby nie wypływała z niego z podziwu godną dokładnością. Pozwala nam ono wyprzedzić obserwację, odkrywając nam przyczynę niektórych osobliwych ruchów, przewidzianych przez astronomów, lecz które bądź wskutek ich złożoności, bądź też ich niezmiernej powolności mogłyby być poznane przez samą obserwację zaledwie po upływie wielu wieków. Przy jego pomocy empiryzm został całkowicie wygnany z astronomji, będącej obecnie zagadnieniem mechanicznem, w którem elementy ruchu ciał niebieskich, ich kształt i masa są jedynemi niezbędnemi danemi, jakie nauka ta musi zaczerpnąć z obserwacji...

Rozmyślania nad prawem ciążenia powszechnego.

(Rozdział XVII. Ks. IV).

Rozpatrując całokształt zjawisk systemu słonecznego, można je rozklasyfikować na następujące trzy grupy: pierwsza obejmuje ruchy środków ciężkości ciał niebieskich dookoła ognisk sił głównych, które je pobudzają, druga zawiera to wszystko, co dotyczy kształtu i oscylacji cieczy, które je pokrywają, wreszcie ruch ciał tych dokoła ich środków ciężkości stanowi przedmiot trzeciej grupy. W tym też porządku wyjaśniliśmy (w poprzednich rozdziałach książki) te różne zjawiska i przekonaliśmy się, że są one koniecznym wynikiem zasady ciążenia powszechnego...

Ruch ziemi, który przez prostotę, z jaką tłumaczy zjawiska niebieskie, doprowadził do rozbicia dotychczasowej Astronomji — znajduje w zasadzie ciążenia nowe potwierdzenie, doprowadzające do najwyższego w naukach fizycznych stopnia oczywistości. Do zwiększenia prawdopodobieństwa teorji dochodzi się bądź przez zmniejszenie ilości hipotez, na których się ona opiera, bądź przez wzmożenie ilości zjawisk, które ona tłumaczy. Zasada ciążenia tak pod

jednym, jak i pod drugim względem poparła teorję ruchu ziemi. Nie dorzuca ona bowiem do teorji tego ruchu, który jest jej koniecznym skutkiem, żadnego nowego przypuszczenia; aby zaś wyjaśnić ruch planet, Kopernik przypisywał ziemi trzy rodzaje różnych od siebie ruchów: jeden dokoła słońca, drugi — obrotowy około własnej osi, trzeci zaś ruch jej biegunów około biegunów ekliptyki. Zasada ciążenia uzależnia je wszystkie od jednego ruchu, nadanego ziemi w kierunku, który nie przechodzi przez jej środek ciężkości. Wskutek tego ruchu obraca się ona dokoła słońca i dokoła swej osi, przyjęła ona kształt spłaszczony przy biegunach i działanie słońca i księżyca na ten kształt doprowadzą do powolnego obracania się osi ziemskiej dokoła biegunów ekliptyki. Odkrycie więc tej zasady zredukowało możliwie ilość przypuszczeń, na których Kopernik opierał swoją teorję. Prócz tego ma ona tę zasługę, że wiąże tę teorję z resztą zjawisk astronomicznych. Bez niej eliptyczny kształt torów planet, prawa ruchu planet i komet dokoła słońca, ich perturbacje wiekowe i perjodyczne, liczne odchylenia księżyca i satelitów Jowisza, precessje punktów równonocy, nutacje osi ziemskiej, ruchy osi księżyca, wreszcie przypływ i odpływ morza, byłyby tylko szeregiem danych obserwacji, niczem ze sobą nie powiązanych. Jest rzeczą naprawdę godną podziwu, że różne te, na pierwszy rzut oka zjawiska, wypływają z tego samego prawa.

Czy zasada ta stanowi nieprzywiedlne prawo natury? czy nie jest ona tylko wynikiem nieznanej przyczyny? Tu nieświadomość co do wewnętrznych własności materji zatrzymuje nas i odbiera nam wszelką nadzieję odpowiedzenia w zadawalniający sposób na te pytania.

LAGRANGE.

(1736 — 1813).

L a g r a n g e, wybitny matematyk, twórca mechaniki analitycznej, nazwisko swe w fizyce zawdzięcza zasadzie prędkości przygotowanych, równoznacznej z zasadą zachowania pracy, którą wyraził w formie najogólniejszej.

L a g r a n g e urodził się w Turynie, jako jedenaste z kolei dziecko skarbnika dworu sardyńskiego. Mając 16 lat, wykłada już matematykę w tamtejszej szkole artyleryjskiej, w uniwersytecie zaś studjuje

klasyków rzymskich i matematyków greckich. Po kilku latach zwraca na siebie uwagę matematyków swemi pracami naukowemi. W Turynie zakłada z pomiędzy swych uczniów prywatne towarzystwo naukowe, które zostaje później przekształcone na akademję; sprawozdania tego towarzystwa „Actes de la société privée de Turin", zapełnia swemi rozprawami, jak np. o grach hazardowych, o ruchu cieczy, o drganiu strun i t. d. W r. 1759 zostaje wybrany na członka, a następnie na prezesa berlińskiej akademji umiejętności, przenosi się na stałe do Berlina, gdzie spędza lat dwadzieścia, w następnych latach dostaje nagrody akademji paryskiej za prace astronomiczno - rachunkowe, w r. 1787 przenosi się do Paryża, gdzie drukuje się jego sławna „Mechanika analityczna". Terror rewolucji francuskiej dotyka go boleśnie, gdyż przyjaciel jego, chemik, Lavoisier, ponosi śmierć na szafocie. „Potrzeba było tylko chwili czasu, mówi ze smutkiem, na strącenie tej głowy, na jakiej utworzenie ledwo się wiek cały zdobędzie" [1]. Lagrange bierze później jednak udział w pracach komisji, opracowującej metryczny system miar. Następnie jest profesorem w świeżo otwartej szkole politechnicznej i pisze dla swych uczniów podręczniki analizy i teorji funkcyj, dając pełny wykład rachunku różniczkowego i całkowego. Za cesarza Napoleona I zostaje mianowany senatorem i dostaje tytuł hrabiego. Umiera w r. 1813. Prochy jego spoczywają w Panteonie.

Lagrange odznaczał się usposobieniem niezwykle ujmującem, pełnem prostoty i spokoju, nacechowanem wysoką kulturą umysłową. Pozostawił po sobie bogaty dorobek prac matematycznych. Prace jego z dziedziny fizyki i astronomji mają również charakter nie doświadczalny, lecz matematyczny, analityczny. Zasada pracy przygotowanej, która początkowo w formie teorji dźwigni dojrzewała powoli od czasów Arystotelesa, znajduje w pracach jego wyraz najogólniejszy i daje mu podstawę w jego „Mechanice analitycznej", do ujęcia całej statyki w formie 6-u równań. W drugiej części swego dzieła daje on analogiczne opracowanie dynamiki, którą wyraża w trzech zasadniczych równaniach.

---

[1]) F. Kucharzewski „Mechanika".

O różnych zasadach statyki[1]).

Statyka jest nauką o równowadze sił. Przez siłę rozumie się naogół jakąkolwiek przyczynę, która nadaje, lub usiłuje nadać ruch ciału, do którego przypuszcza się, że jest przyłożoną, i właśnie ilością ruchu, która jest, lub może być nadaną, należy mierzyć siłę. W stanie równowagi siła nie wywiera skutków widzialnych, wywołuje ona tylko dążenie do ruchu; lecz należy ją zawsze mierzyć skutkiem, jaki by wywołała, gdyby nie była powstrzymana. Jeśli przyjąć za jednostkę jakąkolwiek siłę, czyli jej skutek, wyrażenie na każdą inną siłę przedstawi się li - tylko jako stosunek, czyli wielkość matematyczna, która może być przedstawiona przez liczby lub odcinki, i z tego punktu widzenia należy rozpatrywać siły w mechanice.

Równowaga wynika ze zniszczenia kilku sił, które zwalczają się i znoszą nawzajem działania, wywierane wzajemnie na siebie, a zadaniem statyki jest podać prawa, podług których to znoszenie się następuje. Prawa te opierają się na zasadach ogólnych, które można sprowadzić do trzech następujących: zasada dźwigni, zasada składania sił i zasada prędkości przygotowanych (vitesses virtuelles).

1. Archimedes, jedyny z pomiędzy starożytnych, który nam pozostawił teorję równowagi w swoich dwóch księgach „de Aequiponderantibus", czyli „de Planorum aequilibriis", jest autorem zasady dźwigni, która polega, jak wiedzą o tem wszyscy mechanicy, na tem, że jeśli dźwignia prosta jest obciążona jakiemiś dwoma ciężarami, umieszczonemi po obu stronach puktu oparcia w odległościach od tego punktu odwrotnie proporcjonalnych do ciężarów, dźwignia ta będzie w równowadze i jej podpora będzie obciążona sumą obu ciężarów.

Dalej Lagrange przytacza dowodzenie Archimedesa (p. str. 11), prace na ten temat Stevina, Galileusza, Huyghens'a, oraz zastosowanie tej zasady do dźwigni łamanej, prowadzące do zasady momentów. Dalej mówi o możności rozwiązania wszystkich zagadnień statyki na podstawie tej zasady, o zastosowaniu jej do innych machin prostych, o trudnościach powiązania z tą zasadą teorji równi pochyłej i jej pochodnych. Strzeszcza teorję równi pochyłej Stevina (p. str. 37), Galileusza (p. str. 52), Roberwal'a.

2. Drugą podstawową zasadą statyki jest zasada składania sił. Jest ona oparta na przypuszczeniu, że jeśli dwie siły działają jednocześnie na jedno ciało w różnych kierunkach, to te dwie siły są

---

[1]) Lagrange „Mechanique analitique". Przekład niniejszy dokonany został z oryginału francuskiego, z wypisów „Vorreden u. Einleitungen zu Klassischen Werken der Mechanik".

równoznaczne jednej sile, zdolnej nadać ciału taki sam ruch, jaki nadałyby tamte dwie siły działając oddzielnie. Ciało, któremu nadajemy ruch jednostajny, jednocześnie w dwóch różnych kierunkach, przebiega z konieczności przekątnię równoległoboku, którego dwa boki przebiegałoby oddzielnie wskutek każdego z nadanych ruchów. Z czego wniosek, że dwie siły jakiekolwiek, które działają jednocześnie na jedno ciało są równoważne jednej sile, przedstawionej co do wielkości i kierunku przez przekątnię równoległoboku, którego boki przedstawiają odpowiednio wielkości i kierunki dwóch sił danych. Na tem właśnie polega zasada, zwana składaniem sił.

Zasada ta wystarcza sama w sobie do wyznaczenia praw równowagi w każdym przypadku, gdyż składając tak kolejno parami wszystkie siły, dojdziemy ostatecznie do jednej siły, która będzie równoważną wszystkim tym siłom, i która wskutek tego będzie musiała być równą zeru w przypadku równowagi, jeśli układ nie zawiera żadnego punktu oparcia; jeśli zaś takowy istnieje, kierunek tej jednej siły powinien przechodzić przez punkt oparcia.

Dalej następuje rys historyczny rozwoju tej zasady, poczynając od Arystotelesa, po przez prace Archimedesa, Galileusza, Stevina, Varignon'a i Bernoulli'ego.

3. Przystępuję obecnie do trzeciej zasady, która dotyczy prędkości przygotowanych (vitesses virtuelles).

Pod nazwą prędkości przygotowanych należy rozumieć takie prędkości, jakie ciało znajdujące się w równowadze mogłoby przybrać w przypadku, gdyby równowaga była naruszoną, t. j. prędkość, którą to ciało przybrałoby w rzeczywistości w pierwszej chwili swego ruchu; zasada zaś, o którą chodzi, polega na tem, że siły są w równowadze, kiedy są one odwrotnie proporcjonalne do prędkości przygotowanych, zgodnych z kierunkiem tych sił.

Rozpatrując warunki równowagi dźwigni i innych machin, łatwo jest dostrzec prawo, że siła i opór są zawsze w stosunku odwrotnym do dróg, które jedno i drugie mogą przebiec w tym samym czasie.

Elementy tej zasady w jej rozwoju historycznym dostrzega Lagrange w dziełach Guida Ubaldi[1]), Galileusza, Wallis'a i Torricelli'ego.

Zasada prędkości przygotowanych może być wyrażona najogólniej w sposób następujący:

---

[1]) Fizyk włoski, zwolennik Galileusza; żył od 1545 — 1607 r.

Jeśli jakikolwiek układ dowolnej ilości ciał lub punktów, na które poszczególnie działają jakiekolwiek siły, znajduje się w równowadze i jeśli nadamy temu układowi jakikolwiek mały ruch, wskutek którego każdy punkt tego układu przebiegnie nieskończenie małą drogę, która będzie jego prędkością przygotowaną, to suma iloczynów każdej siły przez drogę, którą jej punkt przyłożenia przebiega w kierunku działania tej siły, będzie zawsze równa zeru, jeśli przyjmiemy za dodatnie małe drogi, przebiegane w kierunku działania sił, zaś za ujemne — drogi, przebiegane w kierunku przeciwnym.

[Zasada prędkości przygotowanych jest pewną formą wyrażenia zasady zachowania pracy. Rozpatrzmy np. zastosowanie tej zasady do dźwigni, na której w odległościach odwrotnie proporcjonalnych od osi wiszą dwa ciężarki nierówne, które się równoważą. Przesunięciem przygotowanem każdego ciężarka będzie przesunięcie wzdłuż łuku koła, którego promieniem jest odpowiednie ramię, przy odchylaniu dźwigni o bardzo mały kąt α. Łuki kół, odpowiadających danemu kątowi (α) mają się do siebie, jak promienie (ramiona), jeśli więc ramiona są odwrotnie proporcjonalne do ciężarków, to i łuki będą do tych ciężarków (czyli sił) odwrotnie proporcjonalne, a więc iloczyny z przesunięć przez ciężarki (czyli siły) będą sobie równe. Jeśli teraz przesunięcie w kierunku działania siły ciężkości, czyli przy opuszczaniu się ciężarka przyjmiemy za dodatnie, zaś przesunięcie w górę za ujemne, to suma powyższych iloczynów będzie równa zeru. Iloczyn przesunięcia przez siłę wyraża pracę, praca więc włożona równa się pracy otrzymanej].

Dalej cytuje Lagrange nazwiska tych fizyków, którzy dostrzegli ogólniejszą formę zasady prędkości przygotowanych w latach od 1717—1749.

W ogólności zdaje się, że mogę twierdzić, iż wszystkie zasady ogólne, które możnaby może odkryć jeszcze w nauce o równowadze, nie będą niczem innem, jak tą samą zasadą prędkości przygotowanych, widzianą z innego punktu i różniącą się od niej tylko sposobem wypowiedzenia.

Lecz zasada ta jest nietylko sama przez się bardzo prostą i b. ogólną; ma ona poza tem tę cenną i jedyną zaletę, że może być wyrażona w formule ogólnej, która zawiera wszystkie zagadnienia dotyczące równowagi ciał.

Przedstawimy tę formułę w całej jej rozciągłości; postaramy się nawet przedstawić ją w formie jeszcze ogólniejszej, niż to było czynione dotąd, oraz dać jej nowe zastosowanie.

Co się tyczy samej istoty zasady prędkości przygotowanych, to przyznać należy, iż nie jest ona dość oczywista sama przez się, aby mogła być postawioną jako pewnik, lecz można ją uważać jako wyraz ogólny praw równowagi, wyprowadzonych z dwóch zasad, które wyłożyliśmy powyżej. To też w dowodzeniach tej zasady zawsze wyprowadzaną ona była z tamtych wprost lub ubocznie. Lecz istnieje w statyce inna zasada ogólna i niezależna od dźwigni i od składania sił, chociaż mechanicy zwykle ją do tamtych sprowadzają; zasada ta zdaje się być naturalną podstawą zasady prędkości przygotowanych, można ją nazwać zasadą bloków.

Jeśli kilka bloków jest połączonych razem, we wspólnej ramie, to zbiór ten nazywamy wielokrążkiem lub klubą, kombinacja zaś dwuch wielokrążków, jednego ruchomego, drugiego zaś nieruchomego, objęta wspólnym sznurem, jeden koniec którego jest umocowany, na drugi zaś działa siła — tworzy machinę [1]), w której stosunek siły do ciężaru, zawieszonego na bloku ruchomym, równa się stosunkowi jedności do liczby sznurów, które przechodzą przez wielokrążek, przypuszczając, że są one wszystkie równoległe i pomijając tarcie i sztywność sznura; jest rzeczą bowiem oczywistą, iż wskutek jednostajnego napięcia sznura w całej jego długości, ciężar jest podtrzymywany przez tyle sił równych tej, która naciąga sznur, ile jest sznurów, które podtrzymują ruchomy wielokrążek, ponieważ sznury te są równoległe i ponieważ mogłyby one nawet być uważane za jeden, gdyż moglibyśmy dowolnie zmniejszyć do nieskończoności średnicę bloków.

Mnożąc w ten sposób bloki w wielokrążku ruchomym i nieruchomym i przewijając przez nie wszystkie jeden sznur, za pośrednictwem różnych bloków stałych, możemy przy pomocy tej samej siły, przyłożonej do wolnego końca sznura, utrzymać tyle ciężarów, ile jest wielokrążków ruchomych, i każdy z tych ciężarów będzie w tym stosunku do tej siły, jak liczba sznurów wielokrążka, który go podtrzymuje, ma się do jedności.

Zastąpmy, dla uproszczenia, siłę przez ciężar, przerzuciwszy przez blok stały ostatni sznur, na którym zawieszony jest ten ciężar; ciężar ten przyjmiemy za jednostkę i wyobrazimy sobie, że wielokrążki ruchome zamiast podtrzymywać ciężary, są przyczepione do ciał, uważanych za punkty i rozłożonych w ten sposób, że tworzą jakiś dany układ. W ten sposób ten sam ciężar, za pośrednictwem sznu-

---

[1]) Obecnie całą tę machinę nazywamy wielokrążkiem.

ra, obejmującego wszystkie wielokrążki, wywoła różne siły, które działać będą na różne punkty układu wzdłuż kierunku sznurów, które dochodzą do wielokrążków, przyczepionych do tych punktów; stosunek ich do ciężaru jest taki, jak liczba sznurów ma się do jedności; tym sposobem siły te będą reprezentowane przez liczbę sznurów, które wywołują je przez swoje napięcie.

Jest więc rzeczą oczywistą, że, aby układ, na który działają te różne siły, pozostał w równowadze, trzeba, ażeby ciężar nie mógł opuścić się przez jakiekolwiek nieskończenie małe przesunięcie punktów układu, ponieważ bowiem ciężar ma dążność do opuszczania się, to o ile nastąpi sprzyjające temu przesunięcie układu, opuści się on z konieczności.

Oznaczmy przez α, β, γ i t. d. drogi nieskończenie małe, jakie wskutek tego przesunięcia przejdą punkty układu w kierunku sił na nie działających i przez P, Q, R i t. d. liczbę sznurów wielokrążków, przyczepionych do tych punktów, aby wywołać te siły. Jest rzeczą widoczną, że drogi α, β, γ i t. d. będą również odcinkami, o które wielokrążki ruchome zbliżą się do odpowiadających im wielokrążków nieruchomych, i że to przybliżenie zmniejszy długość sznura, który jest przez nie przewinięty o wielkości $P\alpha$, $Q\beta$, $R\gamma$ i t. d.; wskutek niezmiennej długości sznura ciężar opuściłby się o odcinek $P\alpha+Q\beta+R\gamma+$ i t. d. Potrzeba więc dla równowagi sił przedstawionych przez liczby P, Q, R i t. d., ażeby spełnionem było równanie

$$P\alpha+Q\beta+R\gamma+ \text{ i t. d.}=0,$$

które właśnie jest wyrazem analitycznym zasady ogólnej prędkości przygotowanych.

Z tego równania podstawowego przez odniesienie do układu współrzędnych wyprowadza Lagrange w dalszych rozdziałach swego dzieła ogólne warunki równowagi, ujęte w sześć równań, z których trzy odnoszą się do ruchu postępowego, zaś trzy pozostałe — do ruchu obrotowego.

Analogicznie w drugiej części „Mechaniki Analitycznej" Lagrange ustawia jedno zasadnicze równanie ruchu, z którego wyprowadza trzy równania ruchu w odniesieniu do trzech osi współrzędnych.

Rozdział V.

DOŚWIADCZENIA FIZYCZNE, DOTYCZĄCE OBROTU ZIEMI I JEJ MASY.

CAVENDISH.

(1731 — 1810).

NA płycie nagrobka Newton'a w opactwie Westminsterskiem znajduje się wyobrażenie aniołów, ważących na szalach ciała niebieskie. Istotnie, Newton opierając się na znalezionych przez siebie wzorach grawitacyjnych porównywał masy różnych ciał niebieskich. Ażeby jednak poznać bezwzględną wartość masy tych ciał, należało wyznaczyć jakimkolwiek sposobem masę któregokolwiek jednego ciała, a więc np. ziemi. W związku z tem były przedsiębrane próby „zważenia ziemi", czyli wyznaczenia jej masy. Jedną z najbardziej udanych prób w tym kierunku było doświadczenie, wykonane przez angielskiego chemika Henryka Cavendisha w r. 1798.

Pierwsze próby wyznaczenia masy ziemi robione były około r. 1790 w Ameryce Południowej przez członków ekspedycji naukowej Bouguer'a i Condamine'a, następnie podobne, tylko dokładniejsze pomiary wykonane zostały przez Maskelyne'a w r. 1774 u stóp góry Schehallien w Szkocji. Pomiary te opierały się na spostrzeżeniu, że piony, zawieszone po obu stronach góry doznają odchylenia wskutek przyciągania, jakie wywiera na nie masa tej góry. Odchylenie to dało się zmierzyć przez porównanie kąta, który tworzą ze sobą te piony z tym kątem, jaki by tworzyły normalnie w danej szerokości geograficznej. Przyrząd użyty do „ważenia ziemi" przez Cavendisha, a pomyślany przez John'a Michell'a, przypomina wagę skręceń. Moment siły grawitacyjnej równoważony jest przez sprężystość skręconego drutu.

Poniżej podajemy wyjątki ze sprawozdania z pomiarów Cavendisha, zamieszczone w Philosophical Transactions w czerwcu roku 1798.

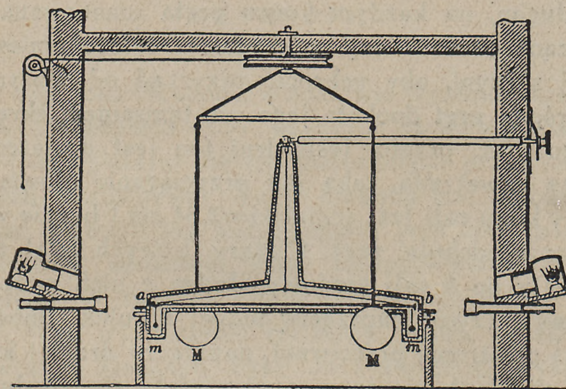
Doświadczenie mające na celu wyznaczenie gęstości ziemi [1]).

Przed kilku laty John Michell, członek Towarzystwa, podał metodę wyznaczenia gęstości ziemi, polegającą na wykazaniu przyciągania pomiędzy małemi ciałami; ponieważ jednak był on zajęty innemi badaniami, dany przyrząd zestawił dopiero na krótko przed śmiercią i nie zdążył przerobić z nim żadnych doświadczeń. Po jego śmierci przyrząd dostał się F. J. H. Wollaston'owi, profesorowi w Cambridge; nie miał on jednak sposobności wykonania doświadczenia i przyrząd łaskawie mnie odstąpił. Przyrząd ten jest b. prosty: składa się on z drewnianego pręta sześć stóp długiego, mocnego i lekkiego. Pręt ten zawieszony jest w pozycji poziomej na drucie czterdzieści cali angielskich długim, na każdym końcu pręta umocowana jest kulka ołowiana, licząca około 2 cali w średnicy; całość umieszczona jest w drewnianej skrzyni, aby uchronić przyrząd od wiatru. O ile by siła jakaś obróciła pręt dookoła jego osi, temsamem skręciłaby podtrzymujący go drut, przeto, jeśli drut ten jest dostatecznie giętki, to najmniejsza nawet siła, taka jak przyciąganie ołowianych ciężarów o średnicy kilku cali [cal angielski=2,54 cm.] będzie wystarczającą, aby znacznie odchylić pręt. Ciężary, których miał zamiar użyć p. Michell miały po 8 cali średnicy. Jeden z nich umieszczony był z jednej strony skrzynki naprzeciw jednej z kulek i możliwie blisko niej, drugi zaś po stronie przeciwnej, naprzeciw drugiej kulki, tak, że przyciąganie obu tych ciężarów przyczyniało się zgodnie do skręcenia pręta w jedną stronę [czyli momenty obu sił były zgodne]; kiedy położenie pręta, przyjęte pod działaniem tych ciężarów, już odczytano, ciężary powinny być przestawione, tak, aby skręcić pręt w stronę przeciwną, przyczem nowe położenie pręta powinno być odczytane; połowa różnicy obu tych położeń będzie odchyleniem pręta pod wpływem przyciągania przez ciężary; odchyleniu pręta odpowiada równe jemu skręcenie drutu. [Kąt odchylenia pręta = kątowi skręcenia drutu].

Celem wyznaczenia gęstości ziemi na podstawie tego pomiaru należy znaleźć siłę, potrzebną do skręcenia pręta o kąt dany. P. Michell projektował uskutecznić ten pomiar przez wprawienie pręta w ruch drgający i obserwowanie czasu drgania. P. Michell miał na dwóch, na ten cel przygotowanych podstawkach, umieścić ołowiane ciężary i przysuwać je tak blisko, aby prawie stykały się ze skrzynią; zdaje się, że miał zamiar poruszać je ręką.

[1]) Przekład dokonany z oryginału Philosophical Transactions 1798 r.

Ponieważ siła, z którą kule są przyciągane przez te ciężary, jest bardzo mała, nie większa niż $\frac{1}{50\,000\,000}$ ich ciężaru, jest przeto widocznem, że bardzo mała siła uboczna może wystarczyć, aby przeszkodzić doświadczeniu; z następnych doświadczeń okazuje się, że tą uboczną siłą, od której trudno się uchronić, jest siła, spowodowana przez różnicę temperatury; jeśli bowiem po jednej stronie skrzyni będzie cieplej, niż po drugiej, to powietrze tam rozrzedzi się, podniesie się wskutek tego wgórę, gdy powietrze po drugiej stronie skrzyni opadnie; powstałby przez to prąd, który może spowodować skręcenie drutu.



Rys. 25.

Przyrząd Cavendisha do „ważenia ziemi".

Ponieważ widziałem konieczność uchronienia się od tego źródła błędu, zdecydowałem się umieścić cały przyrząd w pokoju o równej i stałej temperaturze oraz obserwować ruch pręta zzewnątrz za pośrednictwem teleskopu, ołowiane zaś ciężary umieścić w ten sposób abym mógł je poruszać, nie wchodząc do pokoju. Różnica to w sposobie obserwowania zmusiła mnie do wprowadzenia pewnych zmian w przyrządzie P. Michell'a (rys. 25).

[Dalej następuje opis zmienionego nieco przyrządu i pewne uwagi co do sposobu obserwowania].

W pierwszem mojem doświadczeniu drut, na którym zawieszony był pręt, miał $39^1/_4$ cala długości, zrobiony był z posrebrzanej miedzi, której jedna stopa ważyła $2^4/_{10}$ grana: jego sztywność była taka, że

pręt wykonywał jedno wahnięcie w czasie 15 minut. Uważałem, że drut ten nie był dostatecznie sztywny, gdyż tak znacznie skręcał się pod wpływem przyciągania przez ciężary kulek, że dotykały one skrzynki. Wykonałem jednak kilka doświadczeń z tym drutem, zanim go zmieniłem.

Tu podaje C. wyniki kilku doświadczeń, które były naogół zgodne i dawały wychylenia około 14′. Drut miedziany został w następnych doświadczeniach zastąpiony przez drut sztywniejszy; czas wahnięć wynosił obecnie 7,5 min., odchylenie wynosiło około 6′. Wyniki 17 pomiarów zestawia Cavendish w tabeli, podając następujący sposób obliczenia gęstości ziemi:

Przedewszystkiem na podstawie okresu wahań pręta oblicza on siłę, potrzebną do skręcenia drutu o dany kąt, następnie, na podstawie danych z tabelki znajduje siłę, z jaką ciężarki przyciągają kulki, poczem przez porównanie tej siły z siłą przyciągania kulek przez ziemię (czyli ciężarem kulek) oblicza masę ziemi i średnią jej gęstość. Na podstawie 23 pomiarów, które naogół były dość zgodne ze sobą (największa różnica wynosiła $^1/_{14}$), Cavendish znalazł, że średnia gęstość ziemi równa jest 5,48. Zaznacza on w swojem sprawozdaniu, że wyniki pomiarów Maskelyne'a dały na średnią gęstość ziemi liczbę 4,5. Podług późniejszych pomiarów (Jolly) okazało się, że średnia gęstość ziemi wynosi 5,5, a masa jej równa się 6000 tryljonów tonn.

[Por. rozpr. Coulomb'a w dziale Elektryczność i Magnetyzm].

FOUCAULT.

(1819 — 1868).

Leon Foucault, fizyk francuski, urodzony w Paryżu, głównie sławę swą zawdzięcza doświadczeniu z wahadłem, które to doświadczenie dało bezpośredni dowód ruchu obrotowego ziemi. Foucault początkowo studjował medycynę i przez trzy lata był preparatorem przy katedrze histologji, następnie zaś zajmował się dagerotypją i przy tych robotach zapoznał się z fizykami Arago i Fizeau, z którymi wspólnie wykonał szereg doświadczeń optycznych; najbardziej znanem z nich jest doświadczenie, dotyczące prędkości światła w powietrzu i w wodzie. Doświadczenie z wahadłem Foucault'a wykonane zostało po raz pierwszy nie w Panteonie, jak błędnie głosi fama, lecz w sklepionej piwnicy, trzy metry wysokiej. Doświadczenie to zostało później powtórzone raz w obserwatorjum i drugi raz, jako demonstracja publiczna—w Panteonie. W dziedzinie elektryczności zbudował F. regulator do lampy łukowej Volty. Dostrzegł on również

ogrzewanie się mas metalowych przy szybkiem ich obracaniu w polu magnetycznem pod wpływem indukowanych w nich prądów nieprawidłowych (błądzących), noszących do dziś dnia nazwę prądów Foucault'a. Wszystkie pomysły F. odznaczają się oryginalnością. Foucault był członkiem paryskiej i berlińskiej akademji umiejętności oraz londyńskiego towarzystwa królewskiego.

Dowód fizyczny ruchu ziemi przy pomocy wahadła obrotowego [1]).

Liczne i ważne obserwacje, których przedmiotem było dotąd wahadło, dotyczyły przedewszystkiem czasu wahań; te zaś, które mam zamiar przedstawić Akademji, odnoszą się przeważnie do kierunku płaszczyzny wahań, której obrót stopniowy ze wschodu na zachód jest widomym znakiem dziennego obrotu kuli ziemskiej.

Aby potwierdzić tę interpretację przez stały wynik, pominę ruch postępowy ziemi, gdyż niema on wpływu na zjawisko, które chcę wykazać, i zrobię przypuszczenie, że obserwator przenosi się na biegun, aby umieścić tam wahadło, doprowadzone do postaci najprostszej, t. j. złożone z jednorodnej ważkiej masy kształtu kulistego, zawieszonej w punkcie absolutnie stałym na giętkiej nici; założę nawet z początku, że ten punkt zawieszenia znajduje się dokładnie na przedłużeniu osi obrotu kuli ziemskiej i że ciała stałe, które go podtrzymują, nie biorą udziału w ruchu dziennym ziemi. Jeśli w warunkach tych wyprowadzimy wahadło z jego położenia równowagi i pozostawimy je pod działaniem siły ciężkości, nie nadając mu żadnego impulsu bocznego, — jego środek ciężkości przejdzie przez położenie pionowe i wskutek prędkości nabytej podniesie się z przeciwnej strony tej pionowej do wysokości niemal równej tej, od której ruch jego się zaczął. Przy dojściu jego do tego punktu prędkość jego wyczerpuje się, zmienia znak i, przeprowadzając go znowu przez położenie równowagi, doprowadza go do punktu, leżącego nieco poniżej jego pierwotnego położenia. W ten sposób wywołujemy ruch wahadłowy tej masy po łuku koła, którego płaszczyzna jest ściśle określona, i któremu bezwładność materji zapewnia niezmienne położenie w przestrzeni. Jeśli więc wahania te trwają przez czas pewien, to ruch ziemi, która bez przestanku obraca się z zachodu na wschód, stanie się dostrzegalnym w przeciwstawieniu do nieruchomości pła-

[1]) L. Foucault „Demonstration physique du mouvement de rotation de la terre au moyen du pendule". Przekład niniejszy dokonany został z oryginału francuskiego, umieszczonego w Comptes Rendues z 3 lutego 1851 r., str. 135 i następne.

szczyzny wahań; ślad tych wahań będzie wykazywał na ziemi obrót podobny do pozornego ruchu sklepienia niebieskiego i, gdyby wahania mogły trwać przez dwadzieścia cztery godziny, ślad ich płaszczyzny wykonałby w tym czasie całkowity obrót dokoła rzutu pionowego punktu zawieszenia wahadła.

Takie są warunki idealne, przy których ruch obrotowy kuli ziemskiej stałby się naocznie dostępny obserwacji. W rzeczywistości jednak jesteśmy zmuszeni obrać punkt zawieszenia na poruszającej się ziemi; ponieważ ciał stałych, na których uczepiony jest górny koniec nitki, niepodobna wyłączyć z ruchu dziennego ziemi, możnaby na pierwszy rzut oka żywić obawę, aby ruch ten, udzielony nitce i wahadłu, nie zmienił kierunku płaszczyzny wahań. Jednak teorja nie wykazuje w tem poważnych trudności, i również doświadczenie wykazało mi, że, pod warunkiem, aby nitka była okrągła i jednorodna, można ją dość szybko skręcać w jednym lub drugim kierunku bez wpływu widocznego na płaszczyznę wahań; opisane więc powyżej doświadczenie powinno dokładnie udać się na biegunie.

Lecz jeśli spuszczamy się do naszej szerokości, zjawisko komplikuje się przez czynnik trudny do ujęcia, na który pragnąłbym zwrócić uwagę geometrów. W miarę, jak zbliżamy się do równika, płaszczyzna pozioma przyjmuje względem osi ziemskiej pozycję coraz bardziej skośną, i pion, zamiast obrócić się dokoła siebie, opisuje stożek mniej lub więcej otwarty; wynika stąd zwolnienie pozornego ruchu płaszczyzny wahań, zanika on na równiku i przyjmuje kierunek przeciwny na drugiej półkuli. Ażeby określić prawo, podług którego zmienia się ten ruch w zależności od szerokości, trzebaby uciec się do analizy lub do rozważań mechanicznych i geometrycznych, które nie pomieściłyby się w ograniczonych ramach tej rozprawki, muszę więc ograniczyć się do zaznaczenia, że obie metody, pomijające pewne zjawiska wtórne, zgodnie wykazują, że przesunięcie kątowe płaszczyzny wahań równa się przesunięciu kątowemu ziemi w tym samym czasie, pomnożonemu przez sinus szerokości geograficznej. Zabrałem się więc do roboty z ufnością, używając metody poniżej podanej; stwierdziłem, co do kierunku i prawdopodobnej wielkości, istnienie przewidzianego zjawiska.

W środku sklepienia piwnicy mocno sklepionej przymurowaną została duża bryła z lanego żelaza; miała ona służyć za punkt oparcia dla nici wahadła. Nić ta jest ze stali, silnie zahartowanej działaniem ciągarki do drutu; jej średnica ma $^{6}/_{10}$ do $^{11}/_{10}$ milimetra, długość jej wynosi 2 metry, na dolnym końcu jej umieszczoną jest kula mosiężna

toczona i polerowana, która wykuta była w ten sposób, aby jej środek ciężkości leżał w jej środku geometrycznym. Kula ta waży 5 klg. i ma u dołu ostrę zakończenie, w kierunku przedłużenia nici.

Przystępując do doświadczenia, musimy najpierw usunąć skręcenie nici oraz kręcenie się wahadłowe kuli. Następnie, aby wyprowadzić ją z pozycji równowagi, ujmujemy ją w pętlę z nici organicznej, której wolny koniec uwiązany jest w stałym punkcie na ścianie niedaleko ziemi. Od długości tej nitki, którą możemy dowolnie zmieniać, zależy odchylenie oraz wielkość wahnięć, które chcemy nadać wahadłu. Naogół w moich doświadczeniach odchylenia te równały się na początku 15 do 20°.

Zanim się puści wahadło w ruch, należy zatrzymać jakąś przeszkodą, stopniowo usuwaną, drgania, którym wahadło podlega. Wreszcie, gdy doprowadzone ono zostało do spokoju, przepalamy w którymkolwiek punkcie nić organiczną; pętla. otaczająca kulę, opada i wahadło pod działaniem tylko siły ciężkości zaczyna się poruszać i wykonywać długi szereg wahnięć, których płaszczyzna w krótkim czasie wykazuje widoczne przesunięcie.

Po upływie pół godziny przesunięcie rzuca się w oczy; ciekawą jest jednak rzeczą, stale obserwując zjawisko, upewnić się w jego ciągłości. Do tego posługujemy się pionowem ostrzem, czemś w rodzaju rylca do pisania, umieszczonego na podstawie, którą stawiamy na ziemi w ten sposób, ażeby przy swoim ruchu tam i z powrotem ostrze przedłużenia wahadła w punkcie zwrotnym swojej drogi przeszło tuż ponad ostrzem rylca. Już po minucie ścisła zgodność obu ostrzy zostanie naruszona i ostrze wahadła będzie się stale odchylało na lewo od obserwatora. Wskazuje to, że odchylenie płaszczyzny wahań odbywa się w kierunku składowej poziomej pozornego ruchu sklepienia niebieskiego. Stosunek średniej wielkości tego ruchu do czasu, w którym się odbywa, wykazuje zgodnie z teorją, że w naszej szerokości ślad poziomy płaszczyzny wahań nie wykonuje całego obrotu w ciągu 24 godzin.

Dzięki uprzejmości p. Arago oraz umiejętnej pomocy naszego zręcznego konstruktora p. Froment, który pomagał mi tak czynnie w wykonaniu tej pracy, mogłem powtórzyć to doświadczenie na większą skalę. Korzystając z wysokości sali południowej w obserwatorjum, mogłem nici wahadła nadać długość 11 m. Wahania stały się wolniejsze i szersze, tak, że pomiędzy dwoma następującemi po sobie powrotami wahadła do punktu wyjścia można było wyraźnie zauważyć znaczne odchylenie na lewo.

Na zakończenie dodam jeszcze jedną uwagę. Fakty, zaobserwowane przezemnie, zgadzają się dokładnie z wynikami, podanemi przez p. Poissona w godnej uwagi pracy, odczytanej przed Akademją w poniedziałek 13 lutego 1837 r. W rozprawie tej Poisson, mówiąc o ruchu pocisków w powietrzu, brał pod uwagę dzienny obrót ziemi i wykazał rachunkiem, że w naszej szerokości pociski, wyrzucone w kierunku jakiegoś punktu na horyzoncie, doznają odchylenia, które stale odbywa się w kierunku na prawo od obserwatora, stojącego w punkcie początkowym ruchu i zwróconego twarzą w kierunku ruchu.

Zdaje mi się, że wahadło może być utożsamione z pociskiem, który odchyla się na prawo, kiedy się oddala od obserwatora i który z konieczności odchyla się w kierunku przeciwnym, powracając do swego punktu wyjścia; prowadzi to do stopniowego odchylania się płaszczyzny wahań i do określenia kierunku tego odchylenia.

Wahadło ma tę wyższość nad pociskami, że daje wyniki skumulowane i pozwala przejść z dziedziny teorji do obserwacii bezpośredniej.

TABELKA CHRONOLOGICZNA

Wzniesienie piramidy Cheopsa	3730	lat	przed	Chr.
Pitagoras	582— 500	„	„	„
Anaksagoras	500— 428	„	„	„
Empedokles	490— 430	„	„	„
Demokryt	470— 362	„	„	„
Arystoteles	384— 322	„	„	„
Euklides	ok. 300	„	„	„
Arystarch	„ 280	„	„	„
Ptolomeusz	„ „	„	„	„
Archimedes	287— 212	„	„	„
Hipparch	ok. 160	„	„	„
Heron	„ 150	„	„	„
Al Khâzinî	1137	lat	po	Chr.
Założenie uniwersytetów w Bolonji, Padwie, Paryżu, Wiedniu, Oxfordzie, Cambridge	w. XIII	„	„	„
Założenie uniwersytetu w Pradze Czeskiej	1347	„	„	„
„ *Szkoły Głównej w Krakowie*	1364	„	„	„
Przemianowanie ją na Akademię	1400	„	„	„
Leonardo da Vinci	1452—1519	„	„	„
Kopernik	1473—1543	„	„	„
Stevin	1548—1620	„	„	„
Descartes	1596—1650	„	„	„
Galileusz	1561—1642	„	„	„
Torricelli	1608—1647	„	„	„
Pascal	1623—1662	„	„	„
Guericke	1602—1686	„	„	„
Boyle	1627—1691	„	„	„
Mariotte	1620—1684	„	„	„
Newton	1642—1727	„	„	„
Laplace	1749—1827	„	„	„
Lagrange	1736—1819	„	„	„
Cavendish	1731—1810	„	„	„
Foucault	1819—1858	„	„	„

RUCH FALOWY I AKUSTYKA

OPRACOWAŁ

W. WERNER

CZASY STAROŻYTNE. — CZASY NOWOŻYTNE. — MIERZENIE PRĘDKOŚCI GŁOSU.—CZĘSTOŚĆ DRGAŃ CIAŁ DŹWIĘCZĄCYCH.— USYSTEMATYZOWANIE NAUKI O FALACH. — POMIARY POŚREDNIE PRĘDKOŚCI GŁOSU. — REZONANS I WYŻSZE TONY HARMONICZNE.

CZASY STAROŻYTNE.

WIEDZA nasza wykwitła nietylko z właściwej człowiekowi żądzy poznania, ale i z innych jego potrzeb — przedewszystkiem praktycznych, tkwiących w jego warunkach życiowych. One to zawsze poruszały umysł ludzki i skłaniały do zastanawiania się nad otaczającemi zjawiskami. I dziś nawet, gdy badanie zjawisk wyodrębniło się w niezależną, rozgałęzioną, wyspecjalizowaną i szeroko zorganizowaną sferę działalności ludzkiej, sprawy praktyczne, techniczne działają pobudzająco i przynaglająco na zakres badań naukowych. Silniej jeszcze musiało się to odbywać w starożytności, gdy wąski zakres poznania pozwalał jednemu i temu samemu umysłowi łączyć działalność praktyczną z pracą badawczą w najrozmaitszych dziedzinach.

Z nauk fizycznych obok mechaniki, wyrosłej z zagadnień statycznych, związanych przeważnie z budownictwem, do pokaźnego rozwoju w starożytności doszła akustyka, oparta o gałąź sztuki, uprawianą od najniższych szczebli kultury ludzkiej aż do najwyższych, najbardziej wysubtelnionych jej szczytów: o muzykę. Najstarsze pomniki kultury ludzkiej (chińskiej, egipskiej, żydowskiej) świadczą o istnieniu muzyki i narzędzi muzycznych — podobnie jak i obecnie nie są one obce ludom najmniej ucywilizowanym. Pomimo olbrzymiego postępu, dzielącego tę prymitywną muzykę od dzisiejszej, typ narzędzi muzycznych nie zmienił się; zarówno dzikus afrykański, jak europejski muzyk wydobywa dźwięki przez dęcie w piszczałkę (flet, trąba), przez wprawianie w drżenie napiętej struny (starożytna harfa, lira, dzisiejsze skrzypce, fortepian, etc.) lub błony (bęben, kocieł).

Każdy instrument muzyczny może stać się dla umysłu badawczego przyrządem naukowym, nastręczającym cały szereg zagadnień, dotyczących związku między jego własnościami fizycznemi i geometrycznemi a wrażeniami dźwiękowemi. To też dla Greków, uprawiających z zamiłowaniem muzykę, nie było tajemnicą, że dźwięki ro-

dzą się z drgań, które poprzez powietrze dochodzą do ucha; że drgania powolne wywołują dźwięki niskie, drgania szybkie — wysokie. Nie uszło ich uwagi, że dźwięki, tworzące harmonijny zespół, stoją w określonych, wzajemnych stosunkach liczbowych. Zajmują się gamą i akordami, a interwale wyrażają zapomocą stosunków. W tym kierunku naukę o dźwięku rozwinął zwłaszcza P i t a g o r a s.

PITAGORAS, filozof i matematyk grecki, żył w VI w. przed Chr. Odbył podróż do Egiptu, którego kapłani nagromadzili wielkie zasoby wiedzy przyrodniczej, matematycznej i filozoficznej, zazdrośnie strzeżone przed niepowołanem okiem. P i t a g o r a s został kapłanem i zapoznał się ze skarbami nauki, niedostępnymi dla olbrzymiej większości śmiertelników. Po powrocie do Grecji utworzył sektę pitagorejczyków, napoły naukową, napoły religijną; w nauce pitagorejskiej liczby i stosunki liczbowe odgrywały dominującą rolę: tworzą one, jej zdaniem, istotę bytu (fizyka współczesna podziela opinję P i t a g o r a s a o olbrzymiej, podstawowej doniosłości zależności liczbowych, choć nadaje im inne, bardziej trzeźwe i ograniczone znaczenie). Zdaje się, że na przypisywanie liczbom tak wielkiej roli naprowadziło Pitagorasa badanie harmonji muzycznej. Istotnie, pitagorejczycy (pisma samego mistrza zaginęły) zajmowali się między innemi badaniem długości strun, odpowiadających tonom harmonijnym. Posługiwali się przytem monochordem, a więc wprowadzili do badań pierwiastek doświadczalny, co było wyłomem w ówczesnej nauce greckiej, która najchętniej posługiwała się rozumowaniem i wyciąganiem logicznych wniosków z ogólnych, nieraz wcale dowolnych założeń.

Pierwszym, który bliżej wyśledził, na czem polega przewodzenie dźwięków przez powietrze, był H e r o n z Aleksandrji (około r. 100 przed Chr., ob. str. 15); mówi on o drganiu cząsteczek powietrza, które wskutek sprężystości udziela się cząsteczkom sąsiednim i wywołuje kolejne zgęszczenia i rozrzedzenia powietrza, przenoszące się w dal.

CZASY NOWOŻYTNE.

UCZENI starożytni mieli więc zupełnie trafne i dobrze rozwinięte poglądy na zjawiska akustyczne. Stanowisko ich zostało przejęte przez naukę nowożytną, która jednak nie ograniczyła się do ponowienia hipotezy i wykazania, że tłumaczy ona znane już zjawiska, ale szukała poparcia jej przez wysnucie pewnych wniosków i sprawdzenie ich słuszności.

Narzędzia matematyczne starożytności i wieków średnich — algebra i geometrja — nie wystarczały do rozwiązywania i tych i wielu innych zagadnień. Dopiero wynalezienie t. zw. matematyki wyższej, a więc metody fluksji przez Newtona i zasadniczo nie różniącego się od niej rachunku różniczkowego i całkowego przez Leibniz'a (ob. życiorys Newtona), oraz geometrji analitycznej przez Descartes'a — umożliwiło powstanie fizyki teoretycznej w dzisiejszej jej postaci. Teorja ruchów drgających i falowych stanowi jeden z rozdziałów tej nauki.

Dowodu trafności poglądów na akustykę, zaczerpniętych z nauki starożytnej, dostarczył Newton (1642—1727), badając teoretycznie rozchodzenie się fali podłużnej w powietrzu. Wynikiem tej teorji było wyprowadzenie wzoru na prędkość fali w powietrzu.

„Newton wyobraża sobie nieograniczoną linję cząsteczek powietrza i zakłada, że drobny odcinek tej linji doznaje wstrząśnienia początkowego; wykazuje, że to wstrząśnienie przenosi się kolejno na wszystkie warstwy słupa powietrza w taki sam sposób, w jaki przenosi się ruch wzdłuż szeregu sprężystych kul bilardowych; następnie określa czas potrzebny do tego, aby wstrząśnienie, wywołujące wrażenie głosu, dosięgnęło miejsc, dowolnie oddalonych od swego źródła. Newton dochodzi do wniosku, że rozchodzenie się głosu jest jednostajne, a szybkość czyli przestrzeń, przebyta przez głos w przeciągu sekundy, jeśli kierunek rozchodzenia się jest poziomy, ma następującą wartość: pierwiastek kwadratowy z podwójnego iloczynu wyso-

kości, jaką przebywa ciało pod wpływem ciężkości w ciągu pierwszej sekundy, przez wysokość słupa powietrza, któryby utrzymywał w równowadze słup rtęci w barometrze i miał wszędzie gęstość taką samą, jak u podstawy słupa" [1]).

Spróbujmy przełożyć to sformułowanie na język dzisiejszy. Jeśli przez g oznaczymy przyśpieszenie ziemskie, to w pierwszej sekundzie spadku ciało przebywa drogę $s = \frac{1}{2}g$. Jeśli ciśnienie barometryczne p wyrazimy w dynach na cm. kwadratowy, to zrównoważy ono słup powietrza o wysokości h i wszędzie jednakowej gęstości d, czyli $p = hdg$. Stąd $h = \frac{p}{dg}$, a podwójny iloczyn, o którym mowa w podanem powyżej sformułowaniu, wynosi $2sh = \frac{p}{d}$; zatem prędkość głosu

$$v = \sqrt{\frac{p}{d}}$$

zgodnie z dziś używanym wzorem na rozchodzenie się drgań powolnych. Zobaczymy niebawem, że to zastrzeżenie jest bardzo ważne.

§ 1. Mierzenie prędkości głosu.

Mierzenie prędkości głosu i porównywanie wyników z wnioskami, wyprowadzanemi z teorji ruchu falowego, stało się najsilniejszym argumentem za uznaniem głosu za ruch falowy powietrza. Jeszcze przed Newtonem wielkość ta była kilkakrotnie mierzona. Piotr Gassendi (1592—1655) stwierdził, wbrew zapatrywaniu Arystotelesa, że wysokość dźwięku nie wpływa na jego prędkość: wystrzał z działa i jednoczesny wystrzał z fuzji były słyszane jednocześnie ze znacznej odległości. Pierwszy, który zmierzył prędkość głosu ze znośną dokładnością, był zakonnik francuski Mersenne.

Marin Mersenne (1588—1648), przyjaciel i krytyk Descartes'a, przetłumaczył na francuski dzieło Galileusza o mechanice, wydał kilka dzieł uczonych, w których zajmuje się różnemi zagadnieniami fizycznemi, pomiędzy innemi ruchem wahadłowym, wahadłem fizycznem, kształtem strumienia wody, wytryskującej poziomo, teleskopem zwierciadłowym i t. d. Prowadził dalej doświadczenia pitagorejczyków z drganiami struny, badając na monochordzie zależność wysokości tonu od grubości i obciążenia struny. Znalezione

[1]) Cytowane według rozprawy Colladon'a i Sturma, p. n.

przez niego prawa spotykamy dziś jeszcze w licznych podręcznikach fizyki. Prowadził korespondencję z Descartes'em, Torricellim i Pascalem, biorąc żywy udział w wymianie myśli, jaka towarzyszyła wynalazkowi barometru.

Po Mersenne'ie prędkość głosu była mierzona wielokrotnie zarówno przez pojedyńczych badaczy, jak i przez stowarzyszenia naukowe. Już w r. 1660 założona przez uczniów Galileusza w r. 1657 we Florencji Akademja Badań (Academia del cimento) dokonała nowych pomiarów. Zaś w r. 1738 Akademja Paryska powierzyła zbadanie sprawy kilku swoim członkom; pomiarów dokonano, obserwując czas pomiędzy dostrzeżeniem błysku i huku strzałów armatnich, dawanych na drugiej stacji, odległej o 22 klm. Pomiarów dokonywano w różnych warunkach atmosferycznych. Wyniki były niezależne od ciśnienia atmosferycznego i od odległości, natomiast z temperaturą powietrza rosła prędkość głosu. Obliczono, że w temperaturze 0^0 wartość prędkości wynosi 333 m/sek. W r. 1822 inna komisja, w skład której wchodzili Arago, Gay Lussac i Humboldt, powtórzyła te badania; aby usunąć wpływ wiatru, dawano strzały jednocześnie z obu stacyj i brano wartość średnią z obu wymierzonych prędkości. Wynik nie był bardzo pomyślny, gdyż na jednej ze stacyj głos był bardzo słabo słyszany, wartość otrzymana wynosiła 340,08 m/sek. w 16^0, co odpowiada 331,1 w 0^0.

Metodę Akademji stosowali w r. 1823 dwaj Holendrzy Moll i van Beck, którzy osiągnęli wartość 332,05 m/sek., ale zarazem stwierdzili, że tą drogą nie da się wyeliminować całkowicie wpływu wiatru. W r. 1844 Bravais i Martin, mierząc prędkość głosu na szczycie Faulhornu, stwierdzili, że prędkość nie zależy od tego, czy fala posuwa się zdołu do góry, czy zgóry na dół.

W r. 1863 znakomity eksperymentator francuski Regnault przedsięwziął pomiary prędkości głosu w świeżo założonych rurach wodociągowych Paryża. Zarówno chwila wzbudzania fali głosowej przez wystrzał z pistoletu, jak i chwila jej nadejścia były notowane automatycznie: przy wystrzale kula przerywała cienki drucik, stanowiący część obwodu elektrycznego; cienka błonka, uginając się pod wpływem nadbiegającej fali, wytwarzała kontakt elektryczny. Oba sygnały były przenoszone zapomocą elektromagnesu na poruszany równomiernie pasek okopconego papieru; na tym samym papierze były notowane wahania wahadła o znanym okresie, co pozwalało dokładnie obliczyć czas, upływający pomiędzy jednym sygnałem a drugim. Pomiary Regnault'a dały wartość prędkości głosu

równą 330,7 m/sek. w 0°. Nowsze badania, oparte na metodach pomiarów pośrednich (ob. niżej), podają wartość 331,36 m/sek.

Podstawiając we wzorze Newtona ciśnienie atmosferyczne $p=76$ cm. 13,59 gr/cm^3. 981 cm/sek^2=1013000 dyn/cm^2 i d=0,001293 gr/cm^3, otrzymamy $v = 28000$ cm/sek = 280 m/sek, wielkość znacznie niższą od wyników pomiarów doświadczalnych.

Inne, ściślejsze metody obliczania prędkości fali, jakiemi posługiwali się Lagrange (1736—1813) i Euler (1707—1783), doprowadziły do tych samych wzorów, niezależnie od tego, czy przypuszczano, że fala rozchodzi się tylko w jednym kierunku (np. wewnątrz rury wypełnionej powietrzem), czy też na wszystkie strony. Niezgodność zmierzonej prędkości głosu ze wzorami teoretycznemi wywołała szereg prób wytłumaczenia jej. Ale dopiero Laplace (1749—1827) wskazał jej właściwą przyczynę. Przy wyprowadzeniu wzoru Newtona zakładano milcząco, że podczas rozchodzenia się fali, temperatura gazu pozostaje niezmieniona. Tymczasem wiadomo, że każde ściśnięcie gazu wytwarza ciepło i wskutek tego podnosi jego temperaturę; rozrzedzenie działa odwrotnie. Jeśli drgania są powolne, to powstające różnice temperatur pomiędzy warstwami zgęszczonemi i rozrzedzonemi mają dość czasu na wyrównanie się: w tym wypadku założenia teorji są spełnione i, rzeczywiście, fale bardzo długie mają prędkość zbliżoną do tej, jaką przewiduje wzór Newtona.

W wypadku drgań częstych, czyli fal krótkich, takich, jakie występują w zjawiskach dźwiękowych, wywiązywane i pochłaniane ciepło wpływa na zwiększenie sprężystości gazu. Laplace wykazał, że wartość wyrażenia podpierwiastkowego we wzorze Newtona należy pomnożyć przez stosunek ciepła właściwego pod stałem ciśnieniem do ciepła właściwego w stałej objętości. Stosunek ten nie był wówczas dobrze znany, nie mógł więc dostarczyć dowodu ścisłego na słuszność wzoru Laplace'a; przeciwnie, pomiary prędkości głosu dawały w rękę znakomitą metodę wyznaczania go. Pomiary Regnault'a były przedsięwzięte w tym właśnie celu. Wprawdzie były one wykonane w warunkach innych, niż przewiduje teorja Laplace'a, a mianowicie w zamkniętych rurach, zamiast w swobodnej atmosferze; tarcie powietrza o rury komplikowało zjawisko; prócz tego metalowe ściany sprzyjały przynajmniej częściowemu wyrównywaniu temperatur pomiędzy warstwami zgęszczonemi a rozrzedzonemi, zbliżając warunki nieco do tych, dla których Newton wyprowadził swój pierwotny wzór. Istotnie, pomiary Regnault'a wykazały

wpływ średnicy rury na prędkość głosu; w miarę wzrostu średnicy prędkość rośnie. Przytoczona wartość stosuje się do najszerszej z użytych rur, o średnicy 1,1 m. Obliczony z tej wartości stosunek Cp/Cv wyniósł dla powietrza 1,395. Nowsze pomiary, wykonane zarówno metodą akustyczną, jak i innemi metodami, podnoszą tę liczbę do 1,41.

Trudności i niepewności bezpośrednich pomiarów prędkości głosu skierowały uwagę badaczy na możliwość pomiaru pośredniego. Pomiędzy częstością drgań ν, prędkością v i długością fali λ zachodzi prosta zależność

$$v = \lambda\nu.$$

Chodziło o znalezienie sposobów wyznaczenia dwóch wielkości, stojących po prawej stronie tego równania. Zajmiemy się niemi w następnym paragrafie.

Tymczasem szukano potwierdzenia teorji fal głosowych w rozchodzeniu się głosu w ośrodkach ciekłych i stałych.

Francuski matematyk Poisson (1781—1840) badał teoretycznie rozchodzenie się fali podłużnej w takich ośrodkach. W celu sprawdzenia słuszności wzoru, jaki Poisson otrzymał dla prędkości fali, uczony genewski Colladon dokonał pomiaru prędkości głosu w wodzie; badania te stanowią część tylko obszernej pracy, jaką ogłosił razem ze znakomitym matematykiem Sturm'em nad ściśliwością cieczy. Za tę pracę przyznano autorom nagrodę, wyznaczoną w r. 1826 przez Paryską Akademję Nauk.

COLLADON I STURM.

O ściśliwości cieczy [1]).

Obliczenie szybkości głosu i praw jego rozchodzenia się w ciałach ciekłych i stałych jest prawie takie same, jak w przypadku powietrza. Dla naszych celów wystarczy przytoczenie wzoru, przedstawiającego szybkość głosu w cieczach. Aby ułatwić stosowanie tego wzoru, podajemy go w postaci algebraicznej, jaką mu nadał p. Poisson w swej rozprawie.

---

[1]) „Sur la compression des liquides", Annales de Chimie et de Physique. Tom 36, r. 1827.

Niechaj D oznacza gęstość cieczy, k długość słupa cylindrycznego tej cieczy pod znanem ciśnieniem, ε małe skrócenie tego słupa przy danym wzroście ciśnienia p. Jeśli przez v oznaczymy szybkość głosu w tej cieczy, to będzie się ona wyrażała wzorem następującym:

$$v = \sqrt{\frac{p\,k}{D.\,\varepsilon}}$$ [1]

Sprawdzenie tego wzoru dla ciał stałych i ciekłych wymaga doświadczeń bardzo dokładnych. Ziemia nie przedstawia dla takich doświadczeń mas stałych, dostatecznie ciągłych i jednolitych, tak, że nie wydaje się rzeczą prawdopodobną, aby się udało kiedykolwiek sprawdzić wartość obliczoną szybkości głosu w ciałach stałych zapomocą doświadczeń [bezpośrednich] na dużą skalę. Wprawdzie doświadczenia p. B i o t'a, dotyczące szybkości rozchodzenia się głosu w rurach żelaznych, pouczyły nas, że szybkość w tych rurach jest napewno znacznie większa, niż w powietrzu; ale ponieważ głos dochodził go rychlej, niż w przeciągu pół sekundy, to doświadczenia te mogły dać tylko wyniki bardzo niepewne, nie nadające się do sprawdzenia wzoru. Wydaje się nam, że woda jest jedynem ciałem, w którem można dokonać takich doświadczeń z dostateczną dokładnością. Że woda przenosi głos na wielkie odległości, o tem już wiemy. F r a n k l i n zapewnia, że odgłos, wywołany uderzeniem o siebie dwóch kamyków, daje się jeszcze słyszeć przeszło o pół mili; zdaje się jednak, że o zmierzeniu szybkości nie pomyślał.

Jedyne doświadczenie, jakiego dotąd dokonano nad szybkością głosu w ciałach ciekłych, zawdzięczamy p. B e u d a n t; zostało ono

---

[1] $\frac{\varepsilon}{k}$ jest ściśnieniem jednostkowem, a $p : \frac{\varepsilon}{k} = \beta$ nazywamy spółczynnikiem sprężystości objętościowej. Wzór P o i s s o n'a możemy węc napisać w postaci

$$v = \sqrt{\frac{\beta}{D}}$$

Wyprowadzenie tego wzoru: ob. Witkowski, Tom I, wyd. V, ust. 195. Dla ciał stałych szybkość głosu czyli szybkość rozchodzenia sę fal podłużnych wyraża się tym samym wzorem, jeśli zastąpić w nim spółczynnik β przez spółczynnik wydłużenia, czyli t. zw. moduł Young'a E. (Witkowski, tamże, ust. 196).

Wzór powyższy jest zgodny ze wzorem N e w t o n a, ponieważ spółczynnik sprężystości gazu w stałej temperaturze jest liczbowo równy jego ciśnieniu. Chcąc otrzymać sprężystość, t. zw. adiabatyczną t. j. taką, jaką gaz posiada przy zgęszczeniach bardzo szybkich, nie dających czasu na rozpraszanie się wytworzonego ciepła, musimy ciśnienie pomnożyć jeszcze przez stosunek dwóch rodzajów ciepła właściwego: dochodzimy tą drogą do wzoru L a p l a c e'a.

wykonane przed paru laty w wodzie morskiej pod Marsylją. Oto są szczegóły doświadczenia, udzielone nam łaskawie przez tego uczonego. Obaj obserwatorzy znajdowali się w znanej odległości od siebie i byli zaopatrzeni w wyregulowane zegarki. W chwili umówionej ten, który miał wzbudzać głos, dawał znak chorągiewką i jednocześnie uderzał w umieszczony pod wodą dzwon. Obserwator na drugiej stacji miał pomocnika, który płynął tuż koło łodzi i dawał znak, gdy usłyszał głos. Stąd znajdowano czas, jakiego głos potrzebował na przebycie drogi pomiędzy obu stacjami. Ten pomiar nie był jednak bardzo dokładny, gdyż osoba, znajdująca się pod wodą, nie mogła dać znaku w tej samej chwili, w której usłyszała głos. P. Beudant wyliczył ze swych doświadczeń, że szybkość głosu w wodzie morskiej musi wynosić 1500 metrów na sekundę; wynik ten uważa jednak za wartość średnią, gdyż rozmaite doświadczenia dawały znaczne odchylenia.

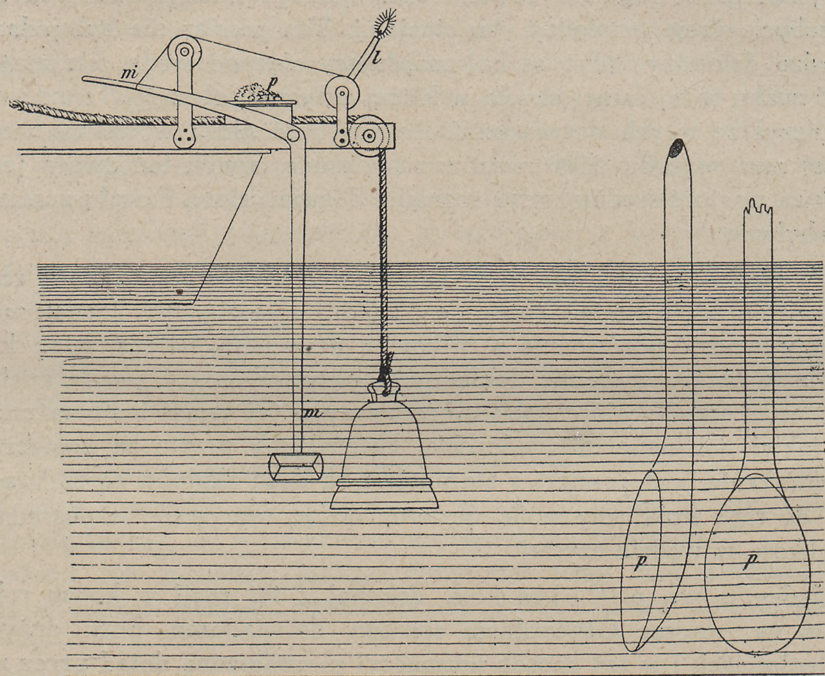
Ta wartość średnia nie różni się zapewne bardzo od szybkości rzeczywistej, zdaje się też, że się dość zgadza z teorją. Aby jednak móc przeprowadzić porównanie z całkowitą pewnością, należy mieć koniecznie pomiar zupełnie dokładny, a przytem należy z całą ścisłością wymierzyć gęstość i ściśliwość cieczy w tej samej temperaturze, w jakiej dokonano doświadczenia. Uważaliśmy przeto za konieczne powtórzenie tych pomiarów starannie i na dużą skalę, a za nadającą się do tego uznaliśmy wodę jeziora, chcąc otrzymać bezpośrednio szybkość w wodzie czystej.

Jeden z nas, p. Colladon, dokonał z tej racji w końcu roku 1826 na jeziorze Genewskiem szeregu doświadczeń przy dużych odległościach i w ten sposób wyznaczył niezmierzoną dotąd przez nikogo szybkość głosu w wodzie czystej.

Doświadczenia początkowe miały na celu tylko wynalezienie najpewniejszego i najwygodniejszego sposobu wydobywania głosu, który mógłby być słyszany na dużą odległość. Z początku doprowadzałem do wybuchu pod wodą różne rodzaje prochu lub uderzałem w rozmaite ciała metalowe, jak dzwonki, kowadła lub dzwony. Ostatni sposób okazał się najlepszym, — nietylko z tego powodu, że był łatwy i natychmiastowy, ale i z powodu natężenia głosu. Dzwon, którego używałem do tych doświadczeń, miał około 7 dm. wysokości i nieco mniejszą średnicę. Wisiał on na belce poza łódką, około metra pod powierzchnią wody (rys. 26). Na tej samej belce umocowano dźwignię *nm*, której ramię górne znajdowało się w łódce, zaś dol-

ne — w wodzie i tam służyło do bicia w dzwon. W ten sposób, pomimo oporu cieczy, mogłem udzielić dzwonowi silnego uderzenia.

Wszystkie te doświadczenia były wykonywane w nocy: nietylko dlatego, aby żadne obce hałasy nie przeszkadzały obserwacji, ale głównie dlatego, aby móc ściśle obserwować sygnały, które dawano zapomocą rakiet lub spalania prochu strzelniczego. Początkowo próbowałem usłyszeć głos dzwonu, zanurzając głowę do wody, ale ta



Rys. 26.
Pomiar prędkości głosu w wodzie.

metoda była niewygodna i niezbyt dokładna: wynalazłem następnie inny sposób, pewny i łatwy, który nadto pozwalał wzmagać do woli natężenie głosu. Ta metoda opiera się na następującem rozważaniu.

Jeśli wydobywać dźwięki z ciała, które znajduje się w spokojnej wodzie nieco pod jej powierzchnią, to osoba, znajdująca się ponad wodą i w małej odległości, będzie słyszała bardzo wyraźnie głos, wydawany przez ciało zanurzone w wodzie. Ale, posuwając się wzdłuż powierzchni wody, zauważy, że natężenie głosu zmniejsza

się bardzo szybko, a w odległości 200 do 300 m. nie będzie słyszała wogóle żadnego głosu zewnątrz wody, nawet umieszczając ucho bardzo blisko jej powierzchni. Jeśli jednak osoba ta zanurzy głowę w wodę w tej samej, albo i w znacznie większej odległości, to natychmiast usłyszy głos zupełnie wyraźnie.

Zdaje się więc, że promienie głosowe, trafiając powierzchnię wody pod kątem bardzo ostrym, nie przechodzą do powietrza, lecz podlegają pewnego rodzaju odbiciu do wnętrza ciekłej masy. Pomyślałem, że jeśli przetnę tę masę płaszczyzną pionową, to falowanie będzie musiało przejść poza tę płaszczyznę, a jeśli poza nią będzie się znajdowało powietrze, to głos udzieli mu się i będzie zatem słyszany w powietrzu otaczającem.

Aby urzeczywistnić ten pomysł, wziąłem rurę cylindryczną z cienkiej blachy, długości 3 m. i około 2 dm. grubości. Zamknąłem ten jej koniec, który miał być zanurzony w wodzie. Do tego końca był przymocowany mocny pierścień; na nim zawieszono ciężary, potrzebne do tego, aby rura mogła pływać pionowo tak, aby jej górny otwarty koniec, do którego się przykładało ucho, wystawał tylko około 5 do 6 dm. ponad powierzchnię wody [1]).

Przy pierwszych doświadczeniach byłem oddalony mniej więcej o 2000 m. od dzwonu. Gdy dałem sygnał do uderzenia w dzwon, usłyszałem natychmiast w rurze zupełnie wyraźnie głos każdego uderzenia, a głos ten był tak silny, że słychać go było jeszcze, trzymając ucho 5 do 6 dm. ponad wylotem rury.

Przy pomocy tego urządzenia doświadczenie stało się bardzo łatwem i pozwalało osiągnąć nadzwyczajną dokładność. Albowiem nie potrzebowałem już pomocnika, któryby mi dawał znak przy nadejściu głosu; sam mogłem jednocześnie widzieć sygnał i słyszeć uderzenie dzwonu, a przez to usunąłem źródło błędów, trudnych do ocenienia. Wreszcie miałem możność wzmocnienia natężenia głosu przez zwiększenie powierzchni rury. Nadałem jej zatem długość 5 m. (rys. 26) oraz postać rozszerzoną u dołu; wylot tego rozszerzenia był pionowy i zamykał się płytą metalową o powierzchni około 20 dm. kwadratowych. Górny koniec rury miał postać stożka, pochylonego względem osi tak, aby można było przyłożyć do niego ucho. Rurę zwracało się tak, aby powierzchnia dolna, zamykająca rozszerzenie rury, była zwrócona ku dzwonowi...

---

[1]) Należy zauważyć, że zapomocą słuchawki, otwartej u dołu, nic się nie słyszy. Słyszy się dopiero wtedy, gdy się głowę zupełnie zanurzy w wodę i ucho wodą napełni, lub gdy się, tak jak ja, używa rury, wypełnionej powietrzem.

Chronometr, którego używałem, mógł być puszczany w ruch oraz zatrzymywany co ćwierć sekundy zapomocą lekkiego naciśnięcia. Ponieważ doświadczenia tymczasowe, dokonywane na odległościach 5 do 6000 m., wykazały możliwość jeszcze większej skali, przeto powtórzyłem doświadczenia w miejscu największej szerokości jeziora, t. j. pomiędzy miasteczkami Rolle i Thonon, w odległości 14000 m.

Trudno było o wybór miejscowości bardziej odpowiedniej dla tych doświadczeń. Głębokość wody pomiędzy tymi punktami jest bardzo duża, a dno ma spadek prawie zupełnie równy po obu stronach — bez żadnego wzniesienia, któreby mogło tamować głos. Można się o tem przekonać z notatki p. de la Bèche, dotyczącej głębokości jeziora Genewskiego, w której podaje przekrój jeziora pomiędzy Rolle i Thonon. Według tego pomiaru, średnia głębokość jeziora pomiędzy temi dwoma miastami wynosi 140 m. Nadto nie dostrzega się na tej przestrzeni ani śladu prądów; woda jest nader przezroczysta, a głębokość jej tak wielka, że ruch fal nie może jej zamącić. Miejsce, w którem był dzwon i miejsce, w którem się znajdowałem w celu słuchania, leżały na linji, wiodącej od dzwonnicy w Thonon do jednego z rogów zamku w Rolle. Obie łodzie były umieszczone każda o 200 m. od swego brzegu. Po kilku doświadczeniach przekonałem się, że dla tej odległości sygnałem najbardziej celowym i momentalnym było nagłe zapalenie dostatecznej ilości prochu strzelniczego. Spalenie około ćwierci funta powodowało błysk, który można było bardzo łatwo zauważyć na drugiej stacji, chociaż krzywizna ziemi zasłaniała mi widok wszystkich przedmiotów, wzniesionych mniej, niż o 9 m. ponad powierzchnię wody. W celu szybkiego zapalenia prochu użyto lontu *l*, który dzięki ruchowi młotka stykał się z prochem *p* w tej samej chwili, w której młotek uderzał w dzwon. Przez to światło spalonego prochu, które służyło jako sygnał, pojawiało się zawsze w tej samej chwili, w której uderzano w dzwon.

Znajdowałem się na drugiej stacji, twarzą zwrócony ku sygnałowi, przyłożywszy ucho do wylotu rury, którą trzymał pomocnik, miałem więc obie ręce wolne i mogłem zatrzymywać chronometr. W chwili dostrzeżenia światła puszczałem chronometr w ruch przez naciśnięcie i zatrzymywałem go w chwili usłyszenia głosu. Droga, przebyta przez wskazówkę, była miarą czasu, jakiego głos potrzebował, aby dojść do mnie.

Pomiędzy zauważeniem sygnału świetlnego czy głosowego i towarzyszącym mu ruchem naciśnięcia chronometru musiała za każdym razem upłynąć pewna

ilość czasu; ponieważ sygnał świetlny dochodził obserwatora w chwili niespodziewanej, a sygnał głosowy — w chwili dokładnie przewidzianej, więc w pierwszym wypadku ruch musiał następować później po otrzymaniu sygnału, niż w wypadku drugim. Z tego powodu czas mierzony jest nieco mniejszy od rzeczywistego, ale błąd popełniony nie może przekraczać ćwierci sekundy.

Podczas trzech różnych dni wykonałem trzy szeregi doświadczeń, których wyniki tu przytaczam.

Obserwowane czasy w sekundach.

7 listop. $9^1/_2$, $9^1/_2$, $9^1/_4$, $9^1/_2$, $9^1/_2$, $9^1/_4$, $9^1/_4$, $9^1/_4$, $9^1/_2$, $9^1/_4$, 9, $9^1/_2$, $9^1/_4$, $9^1/_4$.

15 listop. $9^1/_4$, $9^1/_2$, $9^1/_4$, $9^1/_4$, $9^1/_2$, $9^1/_4$, 9, $9^1/_4$, $9^1/_2$, $9^1/_4$, $9^1/_4$, $9^1/_4$, $9^1/_4$.

18 listop. $9^1/_4$, $9^1/_2$, $9^1/_4$, $9^1/_4$, $9^1/_4$, 9, $9^1/_4$, $9^1/_2$, $9^1/_4$, $9^1/_4$, 9, $9^1/_4$ $9^1/_4$, $9^1/_2$, $9^1/_4$, $9^1/_4$, $9^1/_4$.

Widać z tej tablicy, że czas, jaki upływał pomiędzy pojawieniem się światła i nadejściem głosu, był większy od 9″, a mniejszy od $9''{}^1/_2$. Wartość średnia wynosi nieco więcej, niż $9''{}^1/_4$. Jeśli błąd powyżej wzmiankowany przyjmiemy jako równy niecałej ćwierci sekundy, to możemy uważać 9″,4 za czas, którego głos potrzebował rzeczywiście na przebycie drogi od jednej stacji do drugiej.

Porównajmy teraz ten czas z wzajemną odległością obu stacyj. Jedyny znany pomiar tej odległości został dokonany przez pp. Saussure'a i Pictet'a; znaleźli oni, jako odległość pomiędzy dzwonnicą w Thonon a wieżą w Rolle, 7330 toise'ów [toise=1,949 m.], czyli 14287 m. Ponieważ nie mogłem dostać wyników ich trójkątowania, a pragnąłem przekonać się o dokładności tej liczby, przeto powtórzyłem ten pomiar... Ten pomiar dał mi 14240 m., jako odległość zamku w Rolle od dzwonnicy w Thonon. Pierwszy leży bezpośrednio nad jeziorem, natomiast dwonnica w Thonon jest oddalona od brzegu o 353 m. To daje 13887 m., jako odległość obu brzegów.

Jeśli odjąć od tego 400 m., jako oddalenie obu łódek od brzegów, to otrzymamy 13487 m. na odległość pomiędzy obu stacjami. Liczbę tę można uważać za dokładną przynajmniej do 20 m.

Czas, potrzebny do przebieżenia tej drogi przez głos, był, jak powiedziano, bardzo bliski 9″,4. Ponieważ głos rozchodzi się jednostajnie, więc znajdziemy szybkość głosu czyli przestrzeń, przebytą przez głos w ciągu sekundy, dzieląc przestrzeń 13487 m. przez czas 9″,4, i otrzymamy 1435 m., jako rzeczywistą szybkość głosu w wodzie.

Błąd, popełniony przy obliczaniu tej wielkości, nie powinien przekraczać $^1/_{60}$ wartości prawdziwej.

Tych samych dni, w ciągu których wykonywałem doświadczenia, mierzyłem temperaturę wody w kilku miejscach pomiędzy obu stacjami, na głębokości 3 do 5 m., zapomocą termometru, którego bańka była powleczona woskiem. Na tej głębokości znalazłem temperaturę wszędzie jednakową; wynosiła ona 8,2°C przy Thonon, 8,1° w środku jeziora i 7,9° przy Rolle, wartość średnia równa się więc 8,1°.

Aby porównać te wyniki z obliczeniem, należało dokładnie wyznaczyć ściśliwość tej wody w tej samej temperaturze, a także gęstość jej względem wody destylowanej w 0°.

Woda jeziora w dostatecznej odległości od ujścia Rodanu może być uważana za zupełnie czystą. Zawiera ona ledwo $^1/_{2000}$ swego ciężaru ciał obcych...

Gęstość tej wody w temperaturze 0° różni się bardzo mało od jedności; ściśliwość jej, zmierzona zapomocą piezometru, wynosi 49,5 miljonowych na atmosferę. We wzorze na szybkość głosu

$$v = \sqrt{\frac{p\,k}{D\,\varepsilon}}$$

ciśnienie $p = bgd$, gdzie wysokość słupka rtęci w barometrze $b = 0{,}76$ m., przyśpieszenie ziemskie $g = 9{,}8080$ m/sek^2, gęstość rtęci $d = 13{,}544$; stąd $p = 100{,}97$ jednostek, opartych na metrze, jako jednostce długości. Tak obliczone ciśnienie 1 atmosfery wywołuje ściśnięcie słupa wody o $49{,}5.10^{-6}$ taka więc jest wartość stosunku $\frac{\varepsilon}{k}$ we wzorze.

Podstawiając we wzorze wszystkie te wartości, otrzymuje się po obliczeniu

$$a = 1428.$$

Taka jest więc szybkość głosu, obliczona teoretycznie i wyprowadzona z gęstości i ściśliwości wody w przypuszczeniu, że przy szybkiem ściskaniu cząsteczek nie wywiązuje się ciepło, któreby mogło podnieść ich temperaturę. Szybkość głosu, według naszych doświadczeń, wynosi, jakieśmy wspominali: 13487/9″,4, czyli 1435 metrów.

Prędkość zaobserwowana jest zatem większa od obliczonej, ale różnica wynosi tylko 7 m. Ta różnica jest zbyt mała, aby ją można było przypisać wywiązywaniu się ciepła. Gdyby była nawet dwa lub trzy razy większa, to i tak jeszcze nie przekraczałaby granicy błędów obserwacji. Więc zgodność pomiędzy doświadczeniem a teorją jest tak doskonała, jak tego tylko można było oczekiwać.

CZĘSTOŚĆ DRGAŃ CIAŁ DŹWIĘCZĄCYCH.

JUŻ greccy filozofowie wiedzieli, że wyższym tonom odpowiada większa częstość drgań źródła dźwięku, a pitagorejczycy znali proste stosunki, panujące pomiędzy drganiami tonów, tworzących gamę. Mersenne rozszerzył te badania i znalazł zależność częstości drgań struny od długości, grubości i obciążenia struny. Znalezione prawa dawały możność obliczyć stosunek częstości tonów, wytworzonych w określonych warunkach, ale nie pozwalały na znalezienie ich bezwzględnej wartości.

Dopiero prace teoretyczne szeregu znakomitych matematyków XVIII w. (Taylor, Bernoulli, d'Alembert, Euler, Lagrange) doprowadziły do wzorów teoretycznych na obliczanie częstości drgań różnych ciał drgających. Tak np. znany angielski matematyk Brook Taylor (1685—1731) rozwiązał zagadnienie drgającej struny; wzór jego potwierdził wyniki obserwacji Mersenne'a, ale dał ponadto możność obliczania bezwzględnych wartości. Był to krok naprzód bardzo poważny dla muzyki, gdyż teraz można już było ustalić liczbę drgań kamertonów przez porównywanie ich dźwięku z dźwiękiem drgającej na monochordzie struny.

Prawie jednocześnie udało się fracuskiemu fizykowi Sauveur'owi bezpośrednio wyznaczyć częstość drgań dźwięków organowych.

JÓZEF SAUVEUR (1653—1716), uczony samouk, może być uważany za twórcę akustyki współczesnej. Badał drgania prętów, strun i piszczałek; pierwszy wyznaczał bezwzględną liczbę drgań, odpowiadających poszczególnym tonom. Pomagał też Mariotte'owi w jego doświadczeniach nad ściśliwością powietrza.

Oddawna znane było zjawisko dudnienia, które szczególnie wyraźnie występuje przy organach, jeśli dwie piszczałki nastrojone są prawie na ten sam ton. Gdy dźwięczą jednocześnie, głos okresowo wzmaga się i opada, a częstość tych „dudnień" jest tem mniejsza.

im tony bliższe są siebie; przy zupełnej zgodności dudnienie ustaje.

S a u v e u r pierwszy objaśnił to zjawisko na podstawie teorji falowej, a nadto podał sposób wykorzystania zjawiska dla wyznaczenia częstości drgań obu tonów. Liczba dudnień na sekundę jest równa różnicy częstości obu tonów, a stosunek długości piszczałek równa się stosunkowi długości wysyłanych przez nie fal, czyli równa się odwrotności stosunku częstości drgań. Mamy więc 2 równania, z których łatwo obliczyć częstość drgań każdej z 2 piszczałek, użytych do doświadczenia.

Metoda S a u v e u r'a była jednak pośrednia i niezbyt dokładna. Dopiero zbudowanie w r. 1819 przez C a g n i a r d d e l a T o u r'a przyrządu, nazwanego przez niego *syreną*, umożliwiło bezpośrednie i dokładne wyznaczanie częstości drgań ciał dźwięczących.

BARON CAGNIARD DE LA TOUR [1]).

O s y r e n i e, nowej maszynie akustycznej, przeznaczonej do mierzenia drgań powietrza, stanowiących dźwięk.

Jeśli słusznem jest mniemanie fizyków, że instrumenty muzyczne wytwarzają dźwięki, udzielając powietrzu akustycznemu szeregu powtarzających się uderzeń, wywołanych przez ich własne drgania, to nietrudno pomyśleć o tem, aby wytwarzać dźwięki zapomocą mechanizmu, który pozwalałby wstrząsać powietrzem z taką samą prędkością [częstością] i regularnością.

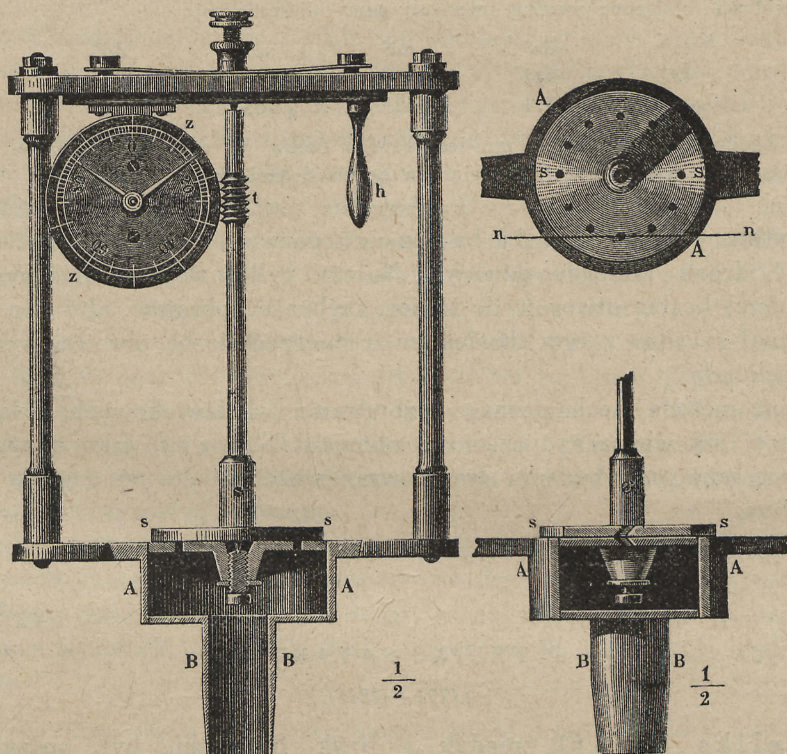
Ten wynik osiągnąłem rzeczywiście moją metodą, polegającą na tem, że strumień powietrza wypuszcza się z dmuchawki przez mały otwór, a naprzeciw niego ustawia się krążek, obracany naokoło swojego środka; krążek jest wprawiany w ruch albo działaniem strumienia powietrza, albo w sposób mechaniczny. Ta część powierzchni krążka, która znajduje się nawprost dmuchawki, jest przebita ukośnie przez pewną liczbę otworów, ułożonych wzdłuż koła współśrodkowego z osią i możliwie jednakowo oddalonych od siebie. Wskutek ruchu krążka otwory te kolejno przesuwają się przed wylotem, który w ten sposób otwiera się, gdy pod nim przechodzi część przebita, i zostaje natychmiast zamknięty przez następującą po niej część pełną.

---

1) Annales de Chemie et Physique, t. 12, z r. 1819.

Wskutek szybkiego ruchu krążka strumień powietrza udziela atmosferze zewnętrznej szeregu uderzeń, wywołując dźwięk podobny do głosu ludzkiego; jest on wyższy lub niższy, zależnie od tego, czy krążek obraca się z większą czy mniejszą prędkością.

Jak widać, celem tej konstrukcji było wytworzenie potrzebnych dla powstania dźwięku uderzeń przez ruch obrotowy, łatwy do zmierzenia zapomocą kół zębatych, gdy tymczasem ruch tam i zpowrotem, jaki wykonywują struny i pręty drgające, można wyliczać tylko zapomocą teorji.



Rys. 27.

Dalej następuje opis szczegółowy dobrze znanego przyrządu: wierzch okrągłej puszki metalowej *AA* jest zaopatrzony w 12 ukośnych otworów; krążek ruchomy *ss*, o osi obrotu, leżącej na osi geometrycznej puszki, ma drugie 12 otworów, pochylonych w kierunku przeciwnym, tak, aby powietrze, przedostając się z jednego szeregu otworów do drugiego, wprawiało krążek w ruch wirowy. Można też ruch wywoływać zapomocą układu kół, poruszanych przez ciężar, zawieszony na nici. Liczbę obrotów tego mechanizmu można było regulować.

Dmuchawki używano jedynie w celu przekonania się, czy ton maszyny był zgodny z tonem tego instrumentu muzycznego, według którego regulowano bieg maszyny. Instrumentem tym był kamerton, nastrojony na *C*, tak jak fortepian. Wydobywanie tonów odbywało się podobnie jak w skrzypcach, przez pocieranie smyczkiem ramion kamertonów różnej wielkości... Obroty płytki liczono przy pomocy koła *z*, połączonego z nią trybami, a obracającego się $13^1/_2$ raza wolniej.

[W ten sposób autor zdołał wyznaczyć częstość drgań gamy diatonicznej. Podajemy tu otrzymane przez niego wyniki dla kilku tylko tonów, a poniżej częstości, obliczone według interwali gamy diatonicznej:

la^1	do^2	mi^2	sol^2	do^3
427	511	630	765	1023
427	511	639	766	1022

Zgodność, z wyjątkiem *mi*, jest bardzo dobra. W dzisiejszej muzyce jako zasadniczy ton *la* przyjmuje się ton o 435 drganiach na sekundę].

Syrena Cagniard de la Tour'a pozwala łatwo zmierzyć częstość drgań jakiegoś dźwięku. Należy tylko doprowadzić syrenę o znanej liczbie otworów do takiej szybkości obrotów, aby ton jej brzmiał *unisono* z tym dźwiękiem, i mierzyć liczbę obrotów syreny na sekundę.

Inną metodę mechanicznego wzbudzania fal dźwiękowych, o łatwo dającej się wyznaczyć częstości obmyślił Savart, jako przyrząd pomocniczy przy badaniu granic wrażliwości słuchu na drgania powietrza.

FELIKS SAVART.

(1791 — 1841).

Feliks Savart, medyk i fizyk francuski, był początkowo lekarzem w Strassburgu i Metzu, lecz niebawem porzucił zawód lekarski, pociągnięty przez badania nad akustyką, dla której rozwoju położył też zasługi niemałe. Badał między innemi drgania prętów, płyt oraz cieczy. Dla wykrycia węzłów i strzałek fal stojących w rurach obmyślił przyrząd, składający się z cienkiej błonki, naciągniętej na pierścień drewniany; błonę, posypaną piaskiem, wpuszcza się na nitce do rury dźwięczącej; błona drga, podrzucając ziarnka piasku, a tylko w płaszczyznach węzłowych pozostaje nieruchomą.

Chcąc znaleźć granicę wysokości tonów dostrzegalnych, zbudował Savart koło zębate, znane pod jego imieniem; opis tego przyrządu i wykonanych z nim doświadczeń, znajdzie czytelnik w dołączonym tekście. Savart badał nadto zjawisko rezonansu, budowę i funkcjonowanie ucha i narządu głosowego. Prócz tego, wraz z Biot'em odkrył prawo, rządzące działaniem prądu elektrycznego na biegun magnesu; prawo to nosi nazwę prawa Biot'a i Savart'a (ob. tom II zbioru niniejszego).

O wrażliwości narządu słuchowego [1]).

Liczni, a znakomici fizycy starali się znaleźć granice, poza któremi tony czy to wysokie, czy niskie nie są już dostrzegalne dla ucha ludzkiego. Dość zgodnie, naogół, ustalono granicę tonów niskich, której odpowiada około 30 drgań na sekundę... Co do granicy tonów wysokich, którą chcę się zająć szczegółowo w tej rozprawie, to pod tym względem fizycy są dalecy od zgody. Chladni przyjmuje, że można jeszcze słyszeć tony, powodowane przez, mniej więcej, 12000 prostych [2]) drgań na sekundę. Biot uważa jako granicę ton piszczałki otwartej 18 linij długiej, której przypisuje 8192 proste drgania na sekundę. Wollaston twierdzi..., że najwyższe tony, jakie można słyszeć, leżą w obszarze pomiędzy 18 a 21000 prostych drgań na sekundę. Jednem słowem można się przekonać, że nie dokonano jeszcze żadnego dokładnego doświadczenia w tym przedmiocie, i że od czasów Sauveur'a akustyka nie uczyniła w tym kierunku najmniejszego rzeczywistego postępu.

Warunki, niezbędne do rozwiązania tego zagadnienia, sprowadzają się do dwóch. Pierwszy polega oczywiście na dokładnem wyznaczeniu liczby drgań ciała dźwięczącego; drugi — na wydobywaniu tonów niezmiernie wysokich, a jednak dość silnych na to, aby mogły być usłyszane.

Tym warunkom czynią w znacznym stopniu zadość drgania prętów o końcach swobodnych. Pręt szklany o długości 119 mm. i średnicy 3 mm. wydawał tony wyraźnie słyszane o częstości 31000 na sek. Drgania pręta jeszcze krótszego (150 mm.) o częstości przeszło 33000 na sek. to dawały się słyszeć, to

[1]) „Notes sur la sensibilité de l'organe de l'ouïe" Ann. de Chim. et de Phys. T. 44 z r. 1830.

[2]) Drganie proste obejmuje ruch pomiędzy dwoma kolejnemi skrajnemi wychyleniami w przeciwnych kierunkach; drganie proste jest połową drgania całkowitego. Liczby tu podane należy podzielić przez 2, aby otrzymać liczby drgań całkowitych, używanych obecnie wyłącznie przy określaniu wysokości tonów.

nie; tę okoliczność autor przypisuje zmiennej wrażliwości ucha oraz różnemu natężeniu wydobywanego dźwięku. Podobny wynik (około 32000) dały drgania poprzeczne prętów stalowych.

Z tych pierwszych doświadczeń zdawałoby się więc wynikać, że ucho nie jest w stanie słyszeć tonów wyższych, niż tony odpowiadające około 32000 prostych drgań na sekundę. Jeśli jednak wziąć pod uwagę, że, aby dojść do tej granicy, należy zawsze używać ciał o wymiarach bardzo nieznacznych, a więc ciał o obszerności drgań również niezmiernie małej, to drogą naturalną nasuwa się pytanie, czy tu rzeczywiście znajduje się granica dla ucha ludzkiego, czy też ton przestaje być dostrzegany dlatego, że nie posiada już dostatecznego natężenia.

W celu rozwiązania tego trudnego pytania należało wytwarzać tony zapomocą takiej metody, któraby pozwalała na zwiększenie obszerności drgań lub, mówiąc ogólniej, na zwiększanie wyrazistości wstrząśnień, udzielanych otaczającemu powietrzu, a zarazem na wyznaczanie w sposób łatwy i jak najdokładniejszy liczby drgań lub uderzeń, udzielanych powietrzu zewnętrznemu. Wydawało mi się, że cel ten można osiągnąć w zupełności zapomocą koła, obracanego szybciej lub wolniej, którego obwód byłby zaopatrzony w odpowiednią liczbę zębów; zęby te kolejno uderzałyby o jakieś cienkie ciało (np. kartę lub klinowatą płytkę z lekkiego drzewa) umieszczone na stałej podstawie. Można się było łatwo spodziewać, że istotnie otrzyma się w ten sposób tony, których wysokość lub niskość zależałyby, podobnie jak w syrenie p. Cagniard de Latour'a, od większej lub mniejszej liczby uderzeń, wykonanych w czasie określonym; a ponieważ przy takiem urządzeniu można dowolnie zwiększać wyrazistość uderzeń, zwiększając średnicę koła przy zachowaniu tej samej liczby zębów, przeto, rzecz jasna, możnaby zapomocą kół odpowiednio urządzonych wydobywać najwyższe dźwięki skali muzycznej, nie zmniejszając wcale natężenia dźwięku.

Pierwszych doświadczeń dokonałem z kołem mosiężnem o średnicy 24 cm., którego obwód był zaopatrzony w 360 zębów; dźwięki, jakie wydawało, wznosiły się lub opadały w miarę tego, jak szybkość obrotu stawała się większa lub mniejsza; a chociaż pierwszy przyrząd nie posiadał licznika, można było dość łatwo stwierdzić zapomocą chronometru, że otrzymane dźwięki zawsze były w zgodzie z szybkością obrotu. Gdy szybkość się zdwajała, ton podnosił się o oktawę; a jeśli było dostroić monochord tak, aby brzmiał unisono z dźwiękiem, wydobywanem przez koło, można się było przekonać,

że liczba uderzeń była zupełnie taka sama, jak liczba drgań całkowitych struny.

Dźwięki tego niewielkiego przyrządu były bardzo czyste, gdy liczba uderzeń nie przekraczała trzech do czterech tysięcy na sekundę, co odpowiadałoby sześciu do ośmiu tysiącom drgań prostych, ponieważ, podobnie jak w syrenie, uderzenie wraz z następującą po niem ciszą należy uważać za jedno drganie całkowite. Poza tą granicą ton stawał się słaby i tracił znacznie na czystości. Było więc rzeczą widoczną, że, chcąc iść dalej, należało posługiwać się kołem o większej średnicy, nie zwiększając znacznie liczby zębów, aby przy tej samej szybkości obrotu uderzenia były lepiej oddzielone od siebie z powodu większego rozstawienia zębów.

Zbudowałem inny przyrząd, którego koło zębate, również mosiężne, miało 82 cm. średnicy i którego obwód był podzielony na 720 zębów. Dźwięki były dostrzegalne wtedy jeszcze, gdy liczba uderzeń wynosiła 24000 na sekundę, co odpowiadałoby 48000 prostych drgań; a chociaż natężenie dźwięku, ogromne przy 12 do 15000 uderzeń na sekundę, zaczęło już zmniejszać się znacznie, to jednak nie mógłbym powiedzieć, w jakim punkcie ton stawał się zupełnie niedostrzegalny.

Liczbę obrotów znaleziono zapomocą dźwięku drugiego koła zębatego o mniejszej średnicy, zaopatrzonego w 30 do 40 razy mniejszą liczbę zębów, niż duże koło. Ponieważ dźwięk tego drugiego koła jest znacznie niższy, więc można łatwo dostroić monochord na unisono i obliczyć liczbę drgań wywołanych, wreszcie, znając tę liczbę, znaleźć liczbę obrotów koła.

Ponieważ cztery koła o liczbach zębów równych 200, 250, 300 i 400, które więc powinny wytwarzać doskonały akord, istotnie dawały ten akord, przeto można było stąd wywnioskować, że cienkie ciało, uderzające o zęby, nie przepuszczało żadnego z nich bez uderzenia, tembardziej, że było trzymane bardzo krótko pomiędzy palcami; ta okoliczność sama przez się wyklucza niemal zupełnie drgania własne.

Drugi, znacznie prostszy sposób [stwierdzenia tego], polega na tem, iż zapomocą rurki o dość małej średnicy, wdmuchuje się prąd powietrza pomiędzy zęby koła, w kierunku prostopadłym do płaszczyzny koła: jest rzeczą jasną, że powinno stąd wynikać działanie analogiczne do działania syreny p. Cagniard Latour'a..., t. j., że powinien powstać dźwięk, wywołany uderzeniami okresowemi powietrza, wychodzącego z rurki; powietrze to uderza o powietrze zewnętrzne za każdym razem, kiedy przerwa pomiędzy zębami odkrywa wylot rurki. Dźwięk otrzymany powinien być taki sam, jak

ten, który pochodzi od uderzenia zębów o ciało cienkie, o ile tylko to ciało nie przepuszcza żadnego zęba bez dotknięcia go. Doświadczenie poucza, że, używając jednocześnie obu metod, otrzymuje się zapomocą jednej i drugiej ściśle te same tony.

Wyznaczone przez Savart'a granice wrażliwości słuchu uległy nieznacznym tylko zmianom; jednakże wskutek trudności pomiarów, o których wspomina już Savart, granice te nie są zupełnie pewne.

Niemiecki fizyk Seebeck zmienił nieco budowę syreny i wykonał z nią szereg doświadczeń, z których najważniejsze było następujące: jeśli otwory w tarczy syreny są rozmieszczone nierównomiernie, tak np. by czasy pomiędzy kolejnemi przejściami ich przed otworem dmuchawki wynosiły naprzemian t i t_1, to ucho słyszy dźwięk o takiej wysokości, jaka odpowiada impulsom, powtarzającym się w okresie $t+t_1$; prócz tego w pewnych warunkach można było słyszeć ton o oktawę wyższy.

Doświadczenia Seebecka, zanalizował w r. 1843 G. S. Ohm (życiorys p. dział Elektryczności) i doszedł przytem do prawidłowego rozstrzygnięcia pytania, od czego zależy wysokość dźwięku złożonego. Oparł się przytem na twierdzeniu matematyka francuskiego Fourier'a (1768 — 1830).

Twierdzenie to mówi, że każdy ruch okresowy daje się rozłożyć na sumę ruchów składowych sinusoidalnych (harmonicznych prostych) o postaci $a \operatorname{Sin} 2\pi \frac{t}{T}$; najdłuższy okres T ruchów składowych jest równy okresowi ruchu pierwotnego, złożonego; inne okresy są 2, 3, 4... razy krótsze. Zgodnie z tem twierdzeniem, falę dźwiękową można rozłożyć na szereg fal elementarnych, sinusoidalnych; najdłuższa z nich ma długość taką, jak fala pierwotna, inne są 2, 3, 4... razy krótsze. Według Ohma, każda z fal elementarnych wywołuje w naszem uchu wrażenia tonu prostego; wrażenie dźwięku jest złożone, składa się z zespołu tonów, odpowiadających falom elementarnym. Twierdzenie to znane jest w akustyce jako prawo Ohma.

Wysokość, jaką nasze ucho przypisuje dźwiękowi — wyjaśnia Ohm — zależy od częstości najniższego tonu — tonu podstawowego, a zatem od częstości fali złożonej. Ucho ulega tu złudzeniu i ton podstawowy słyszy stosunkowo głośniej, niż wyższe tony uboczne; dowodzi tego proste doświadczenie, wykonane z inicjatywy Ohma: jeśli na skrzypcach wzbudzić jednocześnie dwa tony, stanowiące jeden oktawę drugiego, i w pewnej chwili przerwać ton niższy, to

wyższy brzmi pozornie silniej, niż poprzednio; jeśli przerwać ton wyższy, to niższy wydaje się osłabiony.

Doświadczenia Seebeck'a tłumaczą się teraz jasno: drganie powietrza, wzbudzone przez nierównomiernie po sobie następujące impulsy, było drganiem złożonem o okresie, wynoszącym $t+t_1$; ten okres stanowił o wysokości słyszanego dźwięku. Z tonów wyższych, silnie występował ton o częstości dwukrotnej i mógł być z łatwością wyróżniony jako oktawa tonu podstawowego.

Sposób wyznaczania częstości drgań ciał dźwięczących obmyślili Savart i Duhamel w r. 1840. Polegał on na przymocowaniu do tego ciała lekkiego ostrza (np. szczecinki) i przesuwaniu pod jej końcem okopconej ruchomej powierzchni (obracający się walec). Ostrze, wibrując wraz z dźwięczącem ciałem, kreśli na powierzchni linję falową; mając czas pełnego obrotu walca i liczbę nakreślonych na jego obwodzie fal, można znaleźć częstość badanego drgania. Później zastąpiono walec powierzchnią płaską, na której obok linji falowej są kreślone „sygnały czasu", np. linje, rysowane przez wahadło, również zaopatrzone w ostrze. Znając okres wahadła, znamy czas, odpowiadający odstępowi pomiędzy dwiema linjami. Zastąpiono też ostrze wiązką światła, odbijającą się od małego zwierciadełka, umocowanego do ciała drgającego; powierzchnia okopcona ustąpiła tu miejsca paskowi papieru światłoczułego, który utrwalał zarówno drgania, jak i sygnały czasu.

Ciekawą współczesną modyfikacją pomysłu Savart'a jest t. zw. syrena magnetyczna Franke'go (1891). Składa się ona z elektromagnesu, pomiędzy biegunami którego wiruje płytka żelazna z obwodem wyciętym w zęby; kolejne zmiany ośrodka pomiędzy biegunami zmieniają liczbę linij magnetycznych w eletkromagnesie, a w ten sposób wzbudzają w nawiniętem na rdzeń uzwojeniu wtórnem prądy zmienne, o łatwo dającej się zmierzyć częstości. Doprowadzone do słuchawki telefonicznej, wzbudzają w niej drgania tej samej częstości, i wywołują dźwięk, który można porównywać z dźwiękiem badanym.

USYSTEMATYZOWANIE NAUKI O FALACH PRZEZ H. i W. WEBERÓW.

NAUKA o falach wogóle, a falach głosowych w szczególności rozwijała się na drogach różnorakich; poszczególne zagadnienia otrzymywały rozwiązanie bądź teoretyczne, bądź doświadczalne, ale dopiero w r. 1825, bracia Ernest Henryk i Wilhelm Weberowie, wydali obszerne dzieło p. t. „Nauka o falach", w którem skupili całą ówczesną wiedzę o ruchu falowym i wzbogacili ją własnemi przyczynkami.

ERNEST HENRYK WEBER (1795—1878), fizjolog i anatom, był profesorem w Lipsku.

WILHELM WEBER (1804 — 1891), już jako 21-letni młodzieniec opracował, razem ze swym starszym bratem, „Naukę o falach". W roku 1835 objął katedrę fizyki w Gietyndze, która wówczas należała do Królestwa Hanoweru. W r. 1837, król Ernest August, zniósł konstytucję; siedmiu profesorów gietyngeńskich, a w ich liczbie W. Weber, zaprotestowało przeciw temu, co spowodowało usunięcie ich z katedr. Weber zajmował się dalej prywatnie nauką, organizując między innemi, Towarzystwo Magnetyczne w Gietyndze. W r. 1843 został powołany jako profesor do Lipska, a w r. 1849 powrócił na katedrę w Gietyndze. Tu zaprzyjaźnił się ze słynnym matematykiem i astronomem Gauss'em (1777 — 1855) i razem z nim wykonał szereg doniosłych prac nad pomiarami magnetycznemi, a w szczególności nad magnetyzmem ziemskim. Razem opracowali układ jednostek magnetycznych, a następnie Weber rozszerzył stosowane przy tem zasady na jednostki elektryczne; tak powstały t. zw. bezwzględne układy jednostek elektrycznych i magnetycznych: elektrostatyczny i elektromagnetyczny. W uznaniu zasług Weber'a nazwano jego imieniem jednostkę bezwzględną natężenia prądu w ukła-

dzie elektromagnetycznym (weber=10 amp.). Weber chciał uogólnić prawo Coulomba tak, aby obejmowało nietylko działanie statyczne ale i elektrodynamiczne naboju; założył więc, że siła między dwoma nabojami zależy nietylko od ich odległości ale i od prędkości ruchu względnego. Hipoteza ta (t. zw. prawo elektrodynamiczne Webera) musiała ustąpić wobec teorji elektronowej, która działanie wzajemne nabojów w ruchu sprowadza do działania pól magnetycznych, wzbudzanych tym ruchem (ob. dział Elektryczności). Weber z Gaussem wybudowali w r. 1833 w Gietyndze pierwszy telegraf elektryczny; działał on pomiędzy laboratorjum fizycznem a obserwatorjum astronomicznem, druty były przeprowadzone nad dachami domów; jako sygnały służyły odchylenia igły magnetycznej, źródło prądu składało się z jednego ogniwa.

W dziele swojem Weberowie wykładają systematycznie naukę o falach w ośrodkach stałych, ciekłych i gazowych, dążąc do fizycznej interpretacji teoretycznych wzorów; szczególną uwagę zwrócili na fale na wodzie; starają się wyjaśnić zjawisko uspokojenia wzburzonego morza przez warstwę oliwy, badają doświadczalnie ruchy cząsteczek cieczy podczas ruchu falowego. Szeroko i systematycznie przeprowadzili analizę fal stojących; doświadczalnie sprawdzili szereg wniosków, wynikających z teorji Poisson'a i Cauchy'ego fal w cieczach.

Nauka o falach oparta na doświadczeniach

czyli

o falach cieczy z zastosowaniem do fal głosowych i świetlnych.

Lipsk 1825.

O falach stojących.

§ 11.

Drugim rodzajem drgań, do jakich, w warunkach sprzyjających, ciała są sposobne, są *drgania stojące, oscillatio fixa...* Dotychczas rozpatrywano je bliżej prawie wyłącznie w ciałach dźwięczących, choć są one możliwe nietylko w ciałach stałych i gazach, ale i w ciałach ciekłych, jak wykryliśmy, to po raz pierwszy.

Dźwięczące struny, płyty, dzwony, powietrze dźwięczące w piszczałkach organów i t. p. znajdują się w stanie *drgań stojących* [fal stojących].

Drgania te tem różnią się od drgań [fal] postępujących, że w drga-

niu stojącem wszystkie punkty ciała zaczynają drgania jednocześnie i razem je kończą, a w drganiu postępującem zaczynają drgać kolejno, i te, które najpierw drgać zaczęły, stają się powodem drgań, w jakie wpadają punkty dalsze...

§ 14.

Z doświadczeń naszych wynika, że istnieją dwie drogi wywołania w ciele drgań stojących.

Pierwsza z nich polega na tem, że wszystkie części zdolnego do drgania ciała zostają poruszone jednocześnie, tak, że razem wpadają w drganie... jednocześnie je kończą i zaczynają na nowo... Tę właśnie drogę uwzględniają przeważnie matematycy i poddają ją rachunkowi. Gdy dzwon ma brzmieć, uderzamy go tylko w jedno miejsce; niepodobna wszystkie jego punkty wyprowadzić jednocześnie z ich położeń. Akustyk, który chce wytworzyć figury dźwiękowe na dźwięczących płytach, trzyma je mocno w jednym punkcie, lekko dotyka paznogciem w drugim, a w trzecim pociąga smyczkiem...

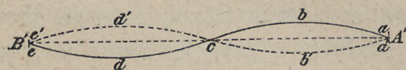
§ 15.

Te wyniki dają się wytłumaczyć drugim sposobem powstawania drgań stojących; zachodzi on w rzeczywistości daleko częściej, niż pierwszy, ale dotychczas był prawie zupełnie pomijany. Chcemy zwrócić na niego uwagę fizyków i matematyków.

Ta droga polega na tem, że jeśli szeregi fal o tej samej długości, mieszczącej się całkowitą liczbę razy w drgającej linji lub powierzchni, posuwają się naprzeciw siebie w kierunkach odwrotnych i z jednakową siłą, to, działając wzajemnie na siebie, przetwarzają swe drgania postępujące na stojące.

§ 16.

Na linie *AB*, umocowanej na obu końcach (dla łatwiejszej obserwacji wystarczająco długiej i grubej i nie zanadto napiętej), rys. 28, nagłem uderzeniem zostaje wzbudzona fala *abc*, która po upływie pewnego czasu przesuwa się do *d* i tam występuje jako wygięcie, oznaczone przez punkty *cd'e*; po upływie drugiego, takiego samego odstępu czasu fala *cd'e* odbija się od punktu umocowania B, przyjmuje przy tem położenie *cde* i dąży do posuwania się ku *A*. Jeśli



Rys. 28.

w tym samym odstępie czasu zostanie wzbudzona przez uderzenie ku górze nowa fala *abc*, dążąca ku *B*, to w punkcie *c* obie fale *abc i cde* wpadną na siebie. Punkt *c*, dzięki przeciwnym działaniom obu fal pozostanie nieruchomy, gdyż fala *abc* pociąga go ku górze z tą samą siłą, z jaką fala *cde* ciągnie ku dołowi. Nie może się więc poruszyć ani wgórę, ani wdół i jest stały, podobnie jak punkty *A* i *B*. Jak uczy doświadczenie, fale uderzające w punkty stałe *A* i *B*, są przez nie odbijane i przyjmują przytem położenie odwrotne, t. j. jeśli wygięcie ich było skierowane przed uderzeniem ku górze, to po odbiciu jest skierowane ku dołowi; podobnie fala *abc*, posuwająca się ku *B*, i fala *cde*, dążąca ku *A*, odbijają się od punktu stałego *c* i przybierają przy tem położenie odwrotne.

§ 17.

W ten sam sposób powstają dwa, trzy, cztery i więcej węzłów, gdy długość fali wzbudzonej równa się nie połowie, lecz jednej trzeciej, czwartej, piątej, lub jakiejkolwiek całkowitej części długości liny, i gdy fale są wzbudzane w regularnych odstępach czasu, odpowiadających odstępom, jakich fala potrzebuje na dwukrotne przebieżenie swej długości [1]...

Łatwo można sprawdzić te wyniki, umocowując koniec długiej liny, której drugi koniec trzymamy w ręku i prędkim, okrężnym ruchem wzbudzamy fale kołowe o określonej długości i w określonych odstępach czasu; łatwo widzieć, jak drganie postępujące zamienia się na stojące, i zgóry można obliczyć spodziewaną liczbę węzłów...

O ruchach cząsteczek wody przy powstawaniu i przenoszeniu się fali.

§ 99.

...Fala *nie jest ciałem* składającem się zawsze z jednych i tych samych cząsteczek; jest ona tylko *kształtem* powierzchni oraz poszczególnych, spoczywających na sobie warstw cieczy, które w spokoju mają postać płaszczyzn poziomych, natomiast w stanie ruchu falowego wyginają się, tworząc wzniesienia i zagłębienia. Przenoszenie się fali jest więc przenoszeniem się tego kształtu. Gdy fala, wzbudzona rzuconem do wody ciałem, rozchodzi się na wielkiej

[1] Obecnie długością fali nazywamy odcinek dwa razy większy, obejmujący zarówno górę, jak i dolinę fali. W dzisiejszem sformułowaniu, wyraz „dwukrotne", byłby więc zbyteczny.

przestrzeni, woda, która je początkowo wytworzyła, pozostaje na miejscu...

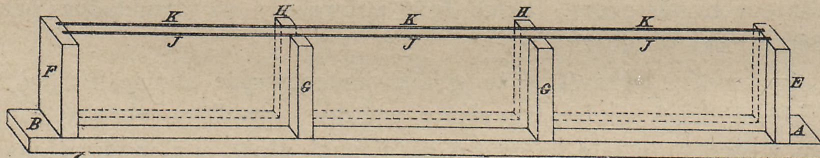
Poszczególne cząsteczki cieczy, przez które fala przechodzi, są w ruchu drgającym w tych miejscach, gdzie fala właśnie się znajduje; ruch ten sięga daleko wgłąb cieczy.

Te wspólne drgania cząsteczek cieczy, aż do jej głębi, powodują zmiany powierzchni i wytwarzają na niej wzniesienia i zagłębienia; gdy drganie się przesuwa, przesuwają się i jego skutki: wzniesienia i zagłębienia...

§ 100.

...Aby drgania te uwidocznić, posiłkowaliśmy się przyrządami do tego celu wynalezionymi, które dla krótkości nazywać będziemy większem i mniejszem korytem falowem.

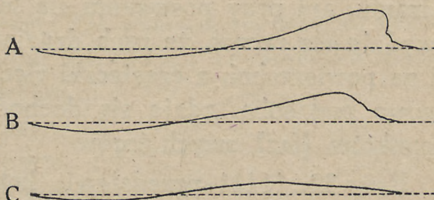
Dwie płyty szklane *JJJ* i *KKK* (rys. 29) o długości 165 cm. i wysokości 20 cm. są ustawione równolegle w odległości około 1,5 cm. w podstawie drewnianej i należycie uszczelnione; pomiędzy płyty wlewa się badaną ciecz. W drugim, większym przyrządzie długość wynosiła 188 cm., wysokość 76 cm., odstęp płyt około 3 cm.



Rys. 29.
Koryto falowe.

Wąska przestrzeń pomiędzy szybami dokładnie poziomo ustawionego przyrządu, została napełniona wodą; użyliśmy do tego umyślnie wody z rzeki Sali, ponieważ pływają w niej liczne drobne cząstki o tym samym ciężarze właściwym co woda. Poprzez ściany szklane i zawartą między niemi wodę, patrzeliśmy ku oświetlonemu oknu, obserwując gołem okiem lub lupą o ogniskowej 1 cm. ruchy, jakie wykonywały cząstki, gdy przechodziła przez nie fala... Przy mierzeniu wielkości torów cząstek, najlepsze usługi oddawał nam maleńki cyrkiel sprężynowy, nastawiany śrubką; ostrza nóżek ustawialiśmy pomiędzy lupą i szybą i tak mierzyliśmy średnice torów. Oglądając bowiem powiększone przez lupę pływające cząstki, widzieliśmy jednocześnie powiększone, cieniutkie ostrza cyrkla, które ściskaliśmy lub rozsuwali zapomocą śrubki, póki odległość ich nie zrównała się ze średnicą toru drgającej cząstki.

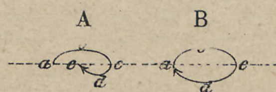
Następnie autorowie opisują szczegółowo swoje doświadczenia. Ograniczymy się do podania ostatecznych wyników, do których dochodzą. Autorowie korzystają przy tem z wcześniej opisanych badań nad kształtem fal na powierzchni cieczy. Gdy wysokość fali jest mała w stosunku do głębokości cieczy, kształt fali jest mniej więcej symetryczny: góra fali ma postać taką samą jak dolina (rys. 30 A). W miarę jak stosunek wysokości fali do głębokości cieczy maleje, grzbiety stają się coraz bardziej strome, szczególnie z przodu fali, doliny pozostają płaskie (rys. 30 B i C).



Rys. 30.
Fala na powierzchni cieczy.

Gdy następujące po sobie i związane z sobą grzbiety i doliny fali są ukształtowane jednakowo lub prawie jednakowo, tory drgań cząsteczek cieczy są zamknięte lub prawie zamknięte i mają postać elips, leżących w płaszczyźnie pionowej (rys. 31 B).

Gdy następujące po sobie i związane z sobą grzbiety i doliny fali są różnej wielkości, tory cząstek drgających nie są zamknięte (rys. 31 A).



Rys. 31.

Tory cząstek drgających w pobliżu powierzchni są, jak widać, elipsami, zbliżonemi do kół: w miarę zwiększania głębokości, postać elips staje się coraz bardziej wydłużona, aż w końcu przechodzi w poziomą linję prostą.

Z rosnącą głębokością tory umieszczonych tam cząstek zmniejszają się zarówno w średnicy pionowej, jak poziomej.

To, że średnica pionowa toru cząstki jest mniejsza, niż pozioma, i że zmniejsza się ona z rosnącą głębokością coraz bardziej w stosunku do poziomej, jest, jak się zdaje, wynikiem oddziaływania dna.

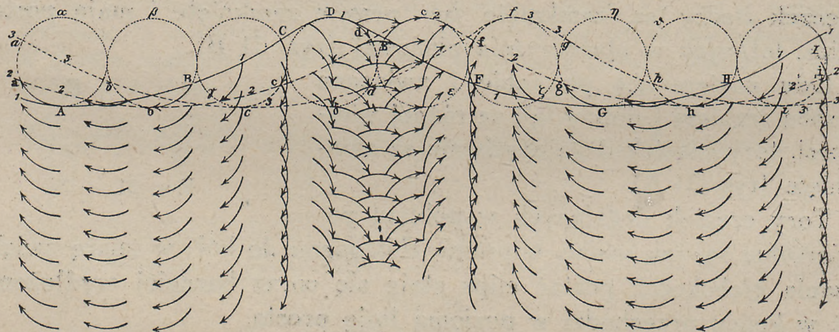
W doświadczeniach naszych drgające ruchy cząstek cieczy dało się zauważyć przez szkła powiększające, a nawet gołem okiem, jeszcze na głębokości, przewyższającej 350 - krotnie wysokość fali na powierzchni.

Rozchodzenie się drgań cząsteczek cieczy polega na tem, że cząsteczki, leżące obok siebie w kierunku posuwania się fali, wpadają w ruch drgający kolejno, i to tak, że nigdy kilka cząsteczek, należących do tej samej fali, nie znajduje się jednocześnie w odpowiednich punktach swych torów [w jednakowych fazach], lecz dochodzą do tych punktów dopiero po kolei.

Lecz w kierunku głębokości nie daje się dostrzec, ani przy wzbudzaniu, ani przy posuwaniu się fali, stopniowe jej rozchodzenie się; wydaje się raczej, że ruch drgający odbywa się jednocześnie wgłębi i na powierzchni, a cząsteczki cieczy, leżące pionowo lub prawie pionowo pod sobą, zdają się dochodzić jednocześnie do odpowiednich punktów [faz] swych torów.

Rys. 32. 11111 przedstawia kontur przekroju pionowego fali, posuwającej się w kierunku strzałek tak, że po upływie pewnego odstępu czasu przyjmie położenie 22222, a po upływie drugiego — położenie 33333.

Koła Aa*a*α, Bb*b*β i t. d. wyobrażają 6 torów, jakie zakreślają cząsteczki, leżące na fali 11111 w punktach ABCDEF, podczas gdy fala przesuwa się o swoją długość. Tory są narysowane jako kołowe; w rzeczywistości są eliptyczne.



Rys. 32.
Tory cząsteczek cieczy.

Łuki Aa*a*, Bb*b* i t. d. wyobrażają części torów, po których przebiegają cząsteczki ABCDEF podczas dwóch odstępów czasu, a mianowicie podczas przesunięcia się fali od 11111 do 22222, a stąd do 33333...

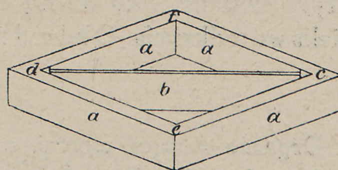
O drganiach stojących w cieczach.

§ 181.

...Jeśli szereg fal o jednakowej długości wypełnia całkowicie przestrzeń prawidłową, zamkniętą ze wszystkich stron, tak, że powstaje prawidłowe łączenie się i rozłączanie fal sąsiednich, posuwających się w kierunkach przeciwnych, to drganie postępujące zamienia się na stojące.

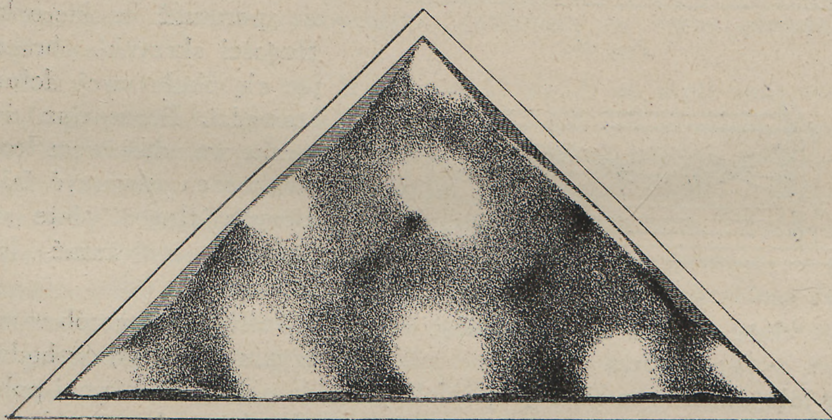
§ 182.

Do skrzynki czworokątnej *aaaa* (rys. 33) wstawia się wzdłuż przekątni deseczkę *b*, zaostrzoną na dolnej krawędzi... Ta deseczka może się poruszać, obracając się około dolnej krawędzi, jak około osi. Jeśli do skrzynki nalać wody lub innej cieczy i poruszać deseczką, to wychodzą z niej fale o szerokości takiej, jak deseczka i do niej równoległe. Te, które poruszają się w stronę *f*, zostają stopniowo odbijane od ścianek *fac* i *fad*.



Rys. 33.
Przyrząd do fal stojących.

Jeśli w czasie, gdy pierwsza fala wzbudzona się posuwa, będziemy poruszali deseczką *b* we właściwem tempie i przez to wzbudzali coraz to nowe fale o tej samej długości, wówczas posuwanie się fal nagle ustaje i, jak za dotknięciem różdżki czarnoksięskiej, na powierzchni pojawia się pewna liczba prawidłowych, stożkowatych wyniosłości, a pomiędzy niemi, również w miejscach określonych



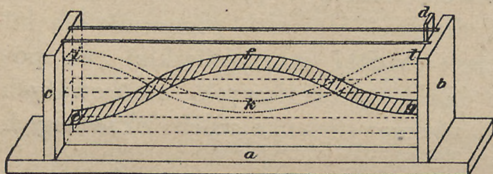
Rys. 34.
Fale stojące w przestrzeni trójkątnej.

i bardzo prawidłowych—pewna liczba lejkowatych zagłębień (rys. 34). *Stożkowate wzniesienia nie posuwają się* tak, jak to czyniły szerokie fale, które im ustąpiły miejsca; ciągły ich ruch powoduje naprzemian pionowe ich opadanie, kończące się utworzeniem w tych samych miejscach lejkowatych zagłębień, gdy jednocześnie lejkowate zagłębienia podnoszą się pionowo, aby w tych samych miejscach wytwo-

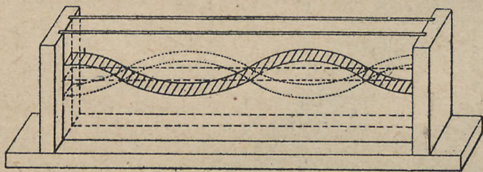
rzyć pagórki... *Powierzchnia cieczy dzieli się na prawidłowe odcinki, z których sąsiednie drgają izochronicznie* [jednocześnie i w tym samym okresie] w kierunkach odwrotnych, czyli drgają tak, jak drgają płyty szklane, gdy dzielą się na podobne odcinki, jak to wykazują ciekawe odkrycia Chladni'ego.

§ 184.

Drganie stojące cieczy, o którem pewne wyobrażenie daje rys. 34, należy już do złożonych postaci drgań. Przy postaciach prostszych wgięcia i wygięcia drgających odcinków nie mają kształtu stożków i lejków, lecz są podobne do zwykłych fal, od których jednak różnią się tem, że nie zmieniają swego położenia w kierunku poziomym.



Rys. 35.



Rys. 36.
Fale stojące w korycie falowem.

Takie drgania stojące można np. wywołać, jeśli do długiej i wąskiej skrzynki o szklanych ścianach (rys. 35) wsunąć deseczkę *d*... tak, aby mogła się poruszać w kierunku długości skrzynki, obracając się około swej dolnej krawędzi. Poruszając deseczkę we właściwem tempie, można utworzyć fale, których długość daje się dowolnie zwiększać lub zmniejszać.

Jeśli w ten sposób w naczyniu (rys. 35) wzbudzimy fale, składające się z góry i doliny, każda o długości równej połowie naczynia *abc*, a następnie w tych samych odstępach czasu drugą, trzecią i t. d., to przy skrzyżowaniu tych kolejno wzbudzanych fal powstaje drganie stojące, wyobrażone na rysunku; woda w naczyniu przyjmuje na przemian położenia *efg* i *ikl*, i ruch ten trwa następnie przez dłuższy czas, choć nie poruszany deseczką *d*...

W ten sam sposób powstaje drganie stojące, wyobrażone na rys. 36, wtedy mianowicie, gdy długość fal wzbudzonych wynosi $^2/_3$ długości naczynia i t. d.

POMIARY POŚREDNIE PRĘDKOŚCI GŁOSU.

POMIĘDZY prędkością głosu v, długością fali głosowej λ i jej częstością n zachodzi związek

$$v = n\lambda.$$

Znając n i λ, można obliczyć v.

Długość fali można zmierzyć, gdy wskutek odbicia wytworzy falę stojącą, a w szczególności, gdy, odbijając się wielokrotnie od końców ciała dźwięczącego o kształcie wydłużonym, pobudzi je do drgań własnych. Gdy chodzi o prędkość w powietrzu, takiem ciałem drgającem może być słup powietrza, zamknięty w rurze piszczałki organowej.

Już w r. 1762 Daniel Bernoulli wpadł na myśl zmierzenia tą drogą prędkości głosu, ale nie otrzymał dobrych wyników, ponieważ nie uwzględnił tej okoliczności, że węzły fali stojącej tworzą się nie na samych końcach piszczałki. Tę trudność ominął dowcipnie Dulong, zamykając koniec piszczałki ruchomym tłoczkiem. Przez silne dęcie wzbudzał wysoki ton harmoniczny, tworzący w piszczałce kilku węzłów; po wsunięciu tłoczka na pewną określoną długość mógł wzbudzić w tak skróconej rurze ton tej samej wysokości, co poprzednio. W drugim wypadku widocznie liczba węzłów była o jeden mniejsza, a zatem tłoczek został przesunięty o długość, odpowiadającą odstępowi 2 węzłów, czyli połowie długości fali. Tą drogą Dulong zmierzył prędkość głosu w różnych gazach i obliczył dla nich stosunki $\frac{C_p}{C_v}$ ze znaczną dokładnością (dla powietrza 1,421, ob. str. 124).

Wertheim (1815—1867) zastosował podobną metodę do ciał ciekłych; piszczałkę zanurzał w badanej cieczy i przepuszczał przez nią pod ciśnieniem strumień cieczy, który pobudzał rurę do dźwięczenia, zupełnie podobnie, jak to czyni strumień powietrza w zwykłych warunkach.

Najlepsze wyniki dała jednak metoda, oparta na wprowadzonym przez Chladni'ego sposobie wykrywała węzłów w ciałach dźwięczących.

ERNEST CHLADNI (1756—1827), fizyk niemiecki, wsławił się swemi badaniami nad akustyką. Wydał kilka rozpraw oraz obszerną „Akustykę" w języku niemieckim i francuskim.

Chcąc sprawdzić wnioski, do których doszli Euler i Bernoulli, którzy obliczali teoretycznie drgania prętów i płyt, Chladni badał te zjawiska doświadczalnie. Po raz pierwszy obserwował przy tej sposobności podłużne drgania prętów i rur metalowych i szklanych; wywoływał je, umocowując jeden koniec pręta i pocierając pręt zwilżoną szmatką. Upodobniwszy drgania takiego pręta do drgania słupa powietrza w rurze z jednej strony zamkniętej, wskazał drogę obliczania prędkości fali w ciałach stałych przez mierzenie częstości drgań i długości fali. Pomysł ten udoskonalił następnie francuski fizyk Wertheim (w r. 1842), który tą drogą wyznaczał prędkość fali w metalach i porównywał z wynikami, otrzymanemi przez Biot'a (patrz życiorys Savart'a) oraz przez siebie i Breguet'a drogą pomiaru bezpośredniego w drutach telegraficznych.

Badając drgania dźwięczących płyt, Chladni użył po raz pierwszy sposobu wykrywania linij węzłowych przez posypywanie płyty miałkim piaskiem; drgania płyty spędzają ziarnka piasku do tych miejsc, które zachowują się nieruchomo podczas drgania. Tak unaocznione węzły tworzą prawidłowe układy linij, znane jako „figury Chladni'ego". Postać ich zależy od kształtu płyty i od sposobu jej pobudzania.

Savart zastosował w r. 1820 sposób Chladni'ego do prętów o przekroju prostokątnym; spostrzegł, że linje węzłowe, tworzące się na jednej z powierzchni pręta, nie leżą nawprost węzłów powierzchni przeciwległej, lecz przypadają pomiędzy nimi. Linje te nie przebiegają przytem prostopadle do długości pręta, lecz idą ukośnie; wszystkie linje węzłowe tworzą razem układ linij o kształcie spirali, opasujących pręt. Savart, a po nim w sposób bardziej szczegółowy Seebeck, objaśnili to zjawisko tem, że jednocześnie z drganiami podłużnemi pręta występują drgania poprzeczne o tej samej częstości; obserwowane węzły są węzłami ruchu, złożonego z tych dwóch ruchów prostych.

W r. 1866 Kundt zastosował sposób Chladni'ego do badania ruchów słupów powietrza, drgających wewnątrz rur szklanych.

AUGUST KUNDT.

(1838 — 1894).

August Kundt był profesorem fizyki kolejno w Zurychu, Würzburgu, Strassburgu i Berlinie. Znakomity eksperymentator, badał doświadczalnie przewodnictwo cieplne, rozszczepienie anomalne, optyczne własności metali i t. d., lecz najbardziej są znane jego badania drgań akustycznych, z których wyjątek przytaczamy poniżej.

DR. AUGUST KUNDT

O nowym rodzaju akustycznych figur pyłkowych i o ich zastosowaniu do wyznaczania prędkości głosu w ciałach stałych i w gazach.[1])

Od czasu pięknego odkrycia Chladni'ego, które pozwala unaocznić postaci drgań ciała dźwięczącego przez posypanie piaskiem lub innym lekkim proszkiem, łatwe to postępowanie stało się w rękach różnych fizyków środkiem, wiodącym do doniosłych wniosków w dziedzinie akustyki...

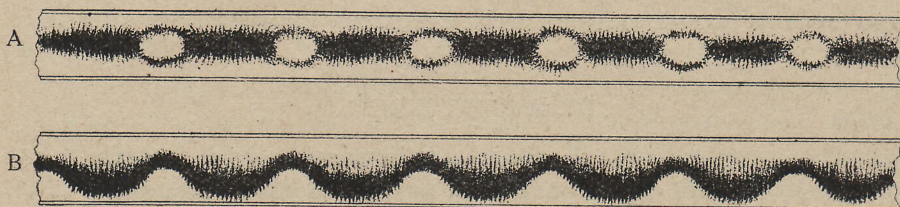
We wszystkich obserwowanych t. zw. figurach dźwiękowych na płytach, dzwonach i prętach, piasek lub pył jest spychany ku linjom węzłowym przez poprzeczne uderzenia dźwięczącego ciała stałego. Również i kolejno występujące linje węzłowe i spiralne, odkryte przez Savart'a na prętach i rurach, drgających podłużnie (ob. str. 151), pochodzą od wtórnych ruchów poprzecznych pręta, jak to wykazał Seebeck... Figur pyłkowych, które byłyby wytworzone przez drgające masy powietrza, np. wewnątrz piszczałki organowej, nie obserwowano dotychczas, i sam się niejednokrotnie przekonałem, że w piszczałkach, otwartych czy krytych, długich czy krótkich... nie występuje prawidłowy ruch wsypanego lekkiego proszku... Udało mi się jednak, przez wzbudzenie w szczególny sposób drgań stojących w słupie powietrza, nietylko poruszyć pył przez ten słup dźwięczący, ale i ułożyć go tak prawidłowo na szeregu fal, że odrysowywał poszczególne fale i zachodzące w nich ruchy (przez pył będę rozumiał zawsze w dalszym ciągu Semen Lycopodii, gdyż zpomiędzy lekkich proszków, ten najlepiej nadaje się do wytwarzania figur)...

Do rury szklanej, długości około 4 stóp i średnicy $^3/_4$ cala, trzeba wsypać nieco Semen Lycopodii i rozsnuć go tak po rurze, aby pył

---

[1]) Ann. der Physik u. Chemie, t. CXXVII, z r. 1866.

przylegał wszędzie do ścianek rury. Gdyby rurę doprowadzić teraz do dźwięczenia podłużnego, pył zebrałby się na dnie w określonych miejscach, należących do spirali S a v a r t'a. Jeśli jednak zatkać oba końce rury szczelnym korkiem i rurę, przytrzymaną w jednym lub dwu węzłach, wprawić w dźwięczenie, pyłki nie podążą do tych miejsc spoczynku, lecz ułożą się w sposób szczególny na dnie rury.



Rys. 37.
Fale stojące w rurze Kundt'a.

Rys. 37A przedstawia obraz figury pyłkowej, jaki powstał w rurze na przestrzeni kilku cali. Widać perjodyczne rozszerzenie *ab*, *bc*, *cd*,... przytem te perjodyczne skupienia są złożone z drobnych prążków, leżących w małych odległościach od siebie... Jeśli rurę pocierać ustawicznie, figury powoli znikają i pył gromadzi się w węzłach spirali S a v a r t'a; jeśli jednak, po rozprowadzeniu pyłu po całej ściance, pocierać rurę bardzo ostrożnie i umiejętnie, to powstają figury jeszcze bardziej prawidłowe, niż na rys. 37A. Rys. 37B wskazuje ułożenie pyłu...

Figury są wywołane przez fale stojące w powietrzu wewnątrz rury... Podnieta do tworzenia tych fal wychodzi z końców rury. Jeśli rurę, zamkniętą z obu końców przez płaskie płytki, np. przez korki, trzymamy w środku i pocieramy na jednym z końców, to swobodne końce wydłużają się i kurczą jednocześnie i, rzecz jasna, powietrze, zamknięte w rurze, jest naprzemian ściskane i rozprężane przez powierzchnie końcowe; to występuje tyle razy w ciągu sekundy, ile drgań wykonywa sama rura. Na każdym z końców słup powietrza otrzymuje tyle uderzeń, jaka jest częstość drgań rury. Wskutek tego słup powietrza wpada w drgania stojące, takie, że ich ton jest dokładnie taki sam, jak ton rury szklanej. Lecz prędkość głosu w szkle jest znacznie większa, niż w powietrzu; temu samemu tonowi odpowiada zatem w szkle długość fali podłużnej o wiele większa, niż długość takiej fali w powietrzu; długości fal, odpowiadające w dwóch ciałach temu samemu tonowi, są proporcjonalne do pręd-

kości głosu w tych ciałach. Głos rozchodzi się w szkle prawie 16 razy prędzej, niż w powietrzu; jeśli więc rura jest trzymana w środku, a pocierana na jednym końcu, to cała jej długość stanowi pół fali; jeśli policzymy miejsca nagromadzenia pyłu w rurze, to znajdziemy ich 16; każda odległość pomiędzy niemi odpowiada zatem połowie długości fali.

Że fale stojące są wzbudzane wewnątrz rury przez uderzenie zamkniętych końców rury, o tem przekonywa następujące doświadczenie. Zamocujmy rurę w $^1/_4$ jej długości, licząc od swobodnego końca, i pocierajmy w połowie; zarówno w miejscu zamocowania, jak i w $^1/_4$ długości, licząc od drugiego końca, potworzą się węzły. Zatkajmy oba końce rury, a powstaną figury pyłkowe, jak poprzednio, coprawda w innej liczbie. Lecz umieśćmy korki nie na końcach, a w węzłach; i teraz mamy pomiędzy korkami zamknięty słup powietrza, ale figury pyłkowe nigdy się nie utworzą, ponieważ korki nie uderzają powietrza, gdyż cząsteczki szkła w węzłach wcale nie wykonywują ruchów...

Figury pyłkowe, wytwarzane wewnątrz rury, mogą być w dwóch kierunkach użyte do pomiarów i wyznaczeń liczbowych. Po pierwsze, jest rzeczą widoczną, że przy ich pomocy można z łatwością znaleźć wysokość tonu rury dźwięczącej podłużnie, gdy jest zamknięta na obu, a przynajmniej na jednym końcu. Wytwarzamy w niej figury zapomocą Semen Lycopodii i wyznaczamy możliwie dokładnie długość fali pyłkowej, mierząc całkowitą długość określonej liczby fal. Ponieważ prędkość głosu w powietrzu o znanej temperaturze jest znana dostatecznie dokładnie, można obliczyć częstość drgania fal w powietrzu. A że ta musi być taka sama, jak częstość drgania rury, więc tem samem mamy znalezioną i tę ostatnią.

Powtóre, widać odrazu, że figury pyłkowe mogą służyć... do wyznaczania prędkości w innych gazach. Jeśli rura zamknięta na obu końcach jest napełniona gazem innym, niż powietrze, to na jednę falę w szkle przypadnie w rurze nie 16, lecz inna liczba fal, uwarunkowana stosunkiem prędkości głosu w szkle do prędkości w badanym gazie. Łatwo dostrzec, że liczby fal pyłkowych w rurach, napełnionych różnemi gazami, mają się do siebie odwrotnie, jak prędkości głosu w tych gazach. Długości fal pyłkowych są wprost proporcjonalne do prędkości głosu...

Do doświadczeń nadają się dobrze rury, napełnione powietrzem, kwasem węglowym [dwutlenkiem węgla], gazem świetlnym i wodorem. Wprawiając te rury w drgania o dwóch węzłach, otrzymuje się prawie

w powietrzu . . . . 32 fale pyłkowe
w kwasie węglowym . . . . . 40 „ „
w gazie świetlnym . . . . 20 „ „
w wodorze . . . . 9 „ „

Zatem prędkości głosu, odniesione do prędkości w powietrzu jako do jednostki, wynoszą:

Kwas węglowy $= \frac{32}{40} = 0,8$
Gaz świetlny $= \frac{32}{20} = 1,6$
Wodór $= \frac{32}{9} = 3,56$

Dulong znajduje dla kwasu węglowego 0,79, a dla wodoru 3,8...

Zamiast gazu, można rurę napełnić dowolną parą; ograniczę się do wzmianki, że para eteru w zwykłej temperaturze daje 50 fal, i że wystarcza nasycić powietrze eterem, aby, zamiast 32, otrzymać prawie 40 fal pyłkowych...

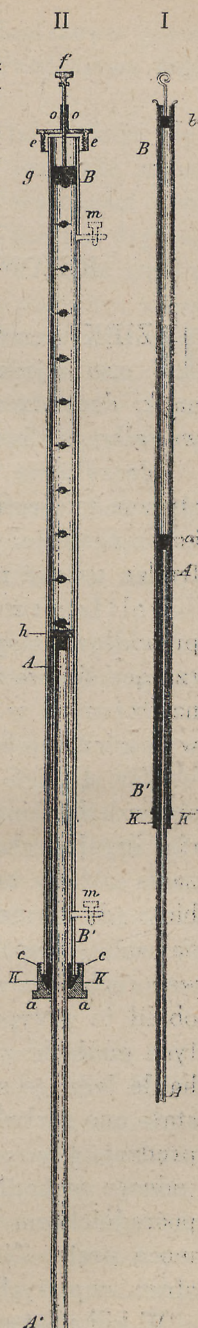
Dla dokładniejszych pomiarów obmyślił autor inny nieco przyrząd, oparty na udzielaniu drgań przez zamknięte końce rury innemu słupowi powietrza.

Na rurę szklaną *AA'* (rys. 38) naklejono korek *KK*, pasujący do drugiej, nieco szerszej rury *BB'*. Koniec *A* rury *AA'* jest zamknięty korkiem *a* kształtu takiego, jak na rysunku; jego szerszy zewnętrzny brzeg prawie wypełnia przekrój rury *BB'*, nie dotykając jednak silnie jej ścianek. Rura *BB'* jest zamknięta na końcu *B* dobrze dopasowanym korkiem *b*; do jego zewnętrznej powierzchni jest przymocowany szklany lub metalowy pręcik, zapomocą którego można przesuwać korek wzdłuż rury. Gdy trzymamy przyrząd w ręku przy *KK* i pocieramy końce *KA'* rury wewnętrznej, to podczas dźwięczenia drugi jej koniec z korkiem *a* uderza powietrze, zawarte pomiędzy korkami *a* i *b* i wprawia je w drganie. Jeśli w rurze znajduje się Semen Lycopodii, to zostanie ono rozmieszczone w rurze w wyżej opisany sposób, na skutek fal stojących w powietrzu. Ta metoda... ma tę wyższość, że po pierwsze, rura, w której powstają figury pyłkowe, sama nie dźwięczy, a zatem prawidłowość figur, wytworzonych przez powietrze, nie może być zakłócona przez drgania rury dźwięczącej; powtóre, przez przesuwanie korka *b* można zmienić długość drgającego słupa powietrza, nie zmieniając długości dźwięczącej rury szklanej; wreszcie niema konieczności używania rury szklanej jako źródła dźwięku; zamiast rury *AA'* można użyć dowolnego masywnego pręta z dowolnej substancji, byleby go można wprawić przez pocieranie w drgania podłużne... Przez to przyrząd...

może służyć bardzo dogodnie do wyznaczania prędkości głosu we wszystkich ciałach stałych, które mogą wykonywać drgania podłużne. Jeżeli zamiast rury *AA'* będziemy umieszczali pręty z metali, drzewa i t. p., utworzymy przez ich dźwięczenie figury pyłkowe w nasuniętej na nie rurze *BB'*; jeśli zmierzymy długość dźwięczącego pręta i długość odpowiadających mu fal pyłkowych, to iloraz tych liczb da odrazu prędkość głosu każdego poszczególnego ciała stałego, w odniesieniu do prędkości głosu w powietrzu, jako do jednostki...

Pręt z substancji, dla której miała być wyznaczona prędkość głosu, był zamocowany we środku, albo w dwóch miejscach, oddalonych o ćwierć długości od jego końców, zapomocą zacisków, przyśrubowanych do stołu. Rura szklana, przeważnie dwa razy dłuższa od badanego pręta, i zamknięta na jednym końcu zatyczką, była nasuwana na długość kilku centymetrów otwartym końcem na poziomo umieszczony pręt i zamocowana w innych zaciskach. Jeśli w rurze znajdowało się Semen Lycopodii i pręt był pobudzany przez pocieranie do dźwięczenia, w rurze powstawały figury pyłkowe, które mierzono.

W ten sposób autor zmierzył prędkość głosu w następujących ciałach stałych: mosiądz dał dla dwóch różnych prętów wartości 10,87 i 10,94; stal — 15,34; szkło 15,24; miedź 11,96, w zgodzie z pomiarami Wertheima (stal 15,1, miedź 11,17). [Liczby te należy pomnożyć przez prędkość głosu w powietrzu (331,36 m/sek), aby otrzymać wartości, wyrażone w m/sek].



Rys. 38. Rura Kundt'a:
I do mierzenia prędkości głosu w ciałach stałych.
II do mierzenia prędkości głosu w gazach.

REZONANS I WYŻSZE TONY HARMONICZNE.

DZIĘKI temu, że zjawiska akustyczne są tylko fragmentem obszerniejszego działu zjawisk falowych, do wielu twierdzeń tej nauki dochodzono z różnych stron: badając albo zjawiska dźwiękowe, albo też inne rodzaje ruchu drgającego i falowego.

Zdarzyło się to między innemi z rezonansem; samo zjawisko akustyczne wzajemnego pobudzania się do dźwięczenia dwóch ciał jednakowo nastrojonych, np. dwóch strun, było znane oddawna, tak, że trudno ustalić nietylko datę ale nawet epokę jego odkrycia.

Galileusz (1638) mówi już o oddźwięku strun i tłumaczy je prawidłowo stopniowem rozkołysaniem struny przez impulsy, powtarzające się we właściwem tempie; wspomina też o rezonansie strun, nastrojonych w stosunku oktawy lub kwinty, lecz pozostawia to bez wyjaśnienia (ob. str. 49).

W r. 1665 Christian Huygens (życiorys ob. dział Optyki) stwierdził na innem zupełnie zjawisku wzajemne oddziaływanie dwóch ciał drgających; zauważył mianowicie, że dwa zegary, których wskazania różniły się o kilka sekund w ciągu doby, wyrównywały swój bieg, gdy je umieszczono w tym samym pokoju. To zjawisko, jak je nazwał, „sympatji" pomiędzy zegarami tłumaczył Huygens wpływem ruchów powietrza w pokoju. Znacznie później, w r. 1739, Ellicot obalił to przypuszczenie, umieszczając zegary w szczelnie zamkniętych pudłach; zjawisko było tak wyraźne, że, gdy zatrzymywano wahadło jednego z zegarów, po upływie kwadransa lub pół godziny zostało ono rozkołysane tak, że zegar zaczynał iść. Zegar ruszał jeszcze prędzej, gdy pudła połączono drewnianym prętem. Wpływ ruchu jednego wahadła na drugie przenosi się więc od pudła do pudła za pośrednictwem ciał stałych: ścian, podłogi lub, lepiej jeszcze, zapomocą pręta. Zjawisko stanowiło doskonałą analogję oddźwięku, np. strun, napiętych na tym samym pudle rezonansowem.

W kilka lat po odkryciu Huygensa dwaj anglicy Noble i Pigot (r. 1677) pierwsi bliżej zbadali rezonans strun. Nazwa tonów

„sympatycznych", nadawana w tej epoce tonom, wzbudzanym przez rezonans, wskazuje, że zdawano sobie sprawę z pokrewieństwa tego zjawiska z zaobserwowanem przez Huygensa.

Noble i Pigot zauważyli też fakt, że struna odpowiada nietylko wtedy, gdy wysokość tonu struny pobudzającej jest taka sama, ale i wtedy, gdy jest ona 2, 3, 4... razy wyższa od wysokości tonu struny rezonansowej. Dla zbadania w tym wypadku postaci drgania struny, nakładali na nią lekkie papierowe „koniki"; drganie struny strącało je na całej długości, z wyjątkiem niektórych punktów, które dzieliły strunę na 2, 3, 4... równe części. Te punkty nieruchome, czyli *węzły*, dzieliły więc strunę na części, drgające oddzielnie, tak, jakgdyby były umocowane w punktach węzłowych. Ton, wydawany przez każdą z tych części miał tę samą wysokość, co ton pobudzający strunę do drgania.

W ten sposób Noble i Pigot stwierdzili, że struna obok tonu podstawowego może wydawać tony o częstości 2, 3, 4... razy większej. W kilka lat później Sauveur wykazał te tony, dotykając struny lekko palcami w miejscach, w których chciał otrzymać węzły, i pobudzając strunę smyczkiem pomiędzy węzłami. Tony te nazwano wyższemi harmonicznemi, gdyż są one ściśle związane z harmonją dźwięków.

Już znany muzyk i kompozytor francuski Jan Filip Rameau (1683—1764) w swem dziele „Nouveau Système de musique théorique" (r. 1726) zwrócił uwagę na to, że dźwięki harmonizujące, czyli takie, których interwały wyrażają się stosunkiem małych liczb całkowitych, mają liczne wspólne wyższe tony harmoniczne; ta okoliczność ma, zdaniem Rameau, stanowić podstawę wrażenia harmonji tych dźwięków. Nieco inaczej, choć też opierając się na istnieniu wyższych tonów harmonicznych, wytłumaczył Helmholtz zjawiska konsonansu i dysonansu.

Już Rameau wyróżniał słuchem obecność wyższych tonów harmonicznych w głosie ludzkim, a Ohm (życiorys ob. dział Elektryczności i Magnetyzmu) uogólnił tę obserwację. Objektywnie stwierdził to Helmholtz, posługując się zjawiskiem, zauważonem przez Weberów: dźwięk widełek strojowych wzmaga się silnie, gdy zbliżyć do nich otwarty cylinder szklany lub butelkę o odpowiednio dobranych rozmiarach; jest to wynikiem rezonansu słupa powietrza, zawartego w cylindrze, gdy ton widełek odpowiada częstości drgań całego słupa, lub jego części, na jakie mogą go podzielić powierzchnie węzłowe. Ten pierwowzór rezona-

torów powietrznych, został następnie udoskonalony przez Helmholtza i spożytkowany do analizy dźwięków (p. niżej), a w szczególności do analizy samogłosek.

Natura drgań przy wymawianiu i śpiewaniu samogłosek zajmowała już dawno umysły uczonych i muzyków; Willis (1832) doszedł do wniosku, że każda samogłoska ma charakterystyczny dla siebie ton o określonej wysokości, niezależnej od wysokości śpiewanej nuty; brzmienie samogłoski nie jest zatem zależne od stosunku tonów, wchodzących w skład dźwięku, lecz od obecności jednego, zupełnie określonego tonu. Willis nie uzasadnił bliżej swego twierdzenia; uczynił to dopiero Helmholtz.

Spotykające się w tym rozdziale, niemal co kilka wierszy, nazwisko H. v. Helmholtza, stanowi już dowód, jakie zasługi położył w dziedzinie akustyki ten wielki uczony (życiorys jego czytelnik znajdzie w dziale Ciepła tej książki). Fizjolog, fizyk i miłośnik muzyki, teoretyk i eksperymentator, badacz i artysta w jednej osobie, miał on więcej, niż kto inny danych, by stworzyć podwaliny współczesnej „nauki o wrażeniach dźwiękowych" (taki tytuł nosi jego znakomite dzieło, wydane w r. 1862), zebrać wszystko, co już wiedziano o fizycznych zjawiskach, towarzyszących wrażeniom słuchowym, zanalizować to, wzbogacić mnóstwem szczegółów doświadczalnych, stworzyć nowe i płodne metody dla dalszych badań. Z nadzwyczaj bogatej treści dzieła Helmholtza wybrano tu tylko nieliczne wyjątki, tak jednak, aby stanowiły pewną całość i wyjaśniały sprawy, poruszane w powyżej podanym szkicowym zarysie historji zagadnień, dotyczących, rezonansu, wyższych tonów harmonicznych i barwy dźwięków.

Nauka o wrażeniach dźwiękowych jako podstawa fizjologiczna teorji muzyki.

PRZEZ H. HELMHOLTZ'A [1])

prof. fizjologji Uniwersytetu Heidelberskiego.

O wrażeniach głosowych wogóle.

Pierwszą i główną różnicą rozmaitych głosów, jaką wyczuwa nasze ucho, jest różnica pomiędzy szmerami i dźwiękami muzycznymi. Świst, wycie i szum wiatru, plusk wody, huczenie i dud-

———

1) „Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik". Brunświk. Wydanie pierwsze z r. 1862. Tłumaczono z wyd. drugiego z r. 1865.

nienie wozu są przykładami głosów pierwszego rodzaju; dźwięki wszystkich narzędzi muzycznych — przykładami głosów drugiego rodzaju.

Dla zrozumienia, na czem polega różnica pomiędzy dźwiękami i szmerami, w większości wypadków wystarcza już dokładna obserwacja samem uchem, bez uciekania się do sztucznych środków. Okazuje się mianowicie naogół, że w ciągu trwania szmeru występują szybkie zmiany różnorodnych wrażeń głosowych. Pomyślmy o dudnieniu wozu po kamiennym bruku, o plusku i szumie wodospadu lub fali morskiej, o szeleście liści w lesie. Mamy tu wszędzie szybkie i nieprawidłowe, lecz dające się wyraźnie rozpoznać zmiany różnorodnych głosów, występujących i ginących błyskawicznie. Natomiast dźwięk muzyczny wydaje się dla ucha głosem zupełnie spokojnym, równomiernym i niezmiennym w ciągu całego swego trwania; nie dają się w nim odróżnić żadne zmiany różnorodnych części składowych. Odpowiada mu więc wrażenie proste i prawidłowe. Wynika stąd jasno, że dźwięki muzyczne są pierwiastkami wrażeń słuchowych prostszymi i bardziej prawidłowymi, że więc na nich należy najpierw badać prawa i właściwości tych wrażeń.

Dochodzimy teraz do dalszego pytania: jaka różnica w zewnętrznych środkach pobudzania wrażeń słuchowych warunkuje różnicę pomiędzy s z m e r e m i d ź w i ę k i e m? Zwykłym i normalnym środkiem pobudzania ucha ludzkiego są wstrząśnienia otaczającej masy powietrza. Nieprawidłowo zmienne wrażenia ucha przy szmerach prowadzą do wniosku, że przy nich i wstrząśnienia powietrza muszą być rodzajem ruchu nieprawidłowego i zmiennego, że natomiast podstawę dźwięków muzycznych tworzy ruch powietrza prawidłowy i równomiernie trwający; musi on być ze swej strony wzbudzany przez również prawidłowy ruch ciała, wysyłającego dźwięki, którego uderzenia powietrze przenosi do ucha.

Badania fizyczne wykryły już rodzaj tych ruchów prawidłowych, które wywołują dźwięki muzyczne. Są to d r g a n i a, czyli odbywające się tam i napowrót ruchy ciał dźwięczących; ruchy te muszą być prawidłowe, okresowe. Możemy więc tak odpowiedzieć na postawione pytanie: „W r a ż e n i e d ź w i ę k u b y w a w y w o ł y w a n e p r z e z s z y b k i e r u c h y o k r e s o w e c i a ł d ź w i ę c z ą c y c h, w r a ż e n i e s z m e r u — p r z e z r u c h y n i e o k r e s o w e".

Dźwięki mogą się różnić między sobą:

1) n a t ę ż e n i e m,
2) w y s o k o ś c i ą t o n u,
3) b a r w ą.

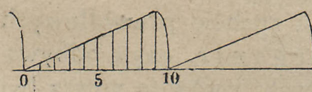
Tłumaczenie, co rozumiemy przez natężenie i wysokość tonu, byłoby zbytecznem. Przez barwę dźwięku rozumiemy tę jego właściwość, dzięki której dźwięk skrzypiec różni się od dźwięku fletu, klarnetu lub głosu ludzkiego, gdy wszystkie biorą tę samą nutę, o tej samej wysokości tonu.

Zapytujemy teraz, jakim zewnętrznym różnicom fizycznym fal głosowych odpowiadają różnice w barwie dźwięków. Wiemy już, że obszerność drgań odpowiada natężeniu, czas drgań — wysokości dźwięku; barwa dźwięku od nich zależeć nie może. Jest więc jedynie możliwem, że barwa dźwięku zależy od sposobu, w jaki odbywa się ruch w obrębie każdego oddzielnego okresu drgania. Przy wytwarzaniu dźwięku muzycznego żądaliśmy tylko, aby ruch ciała dźwięczącego był ruchem okresowym, t. j. aby w każdym okresie drgania działo się to samo, co się już działo w okresach poprzednich. Rodzaj ruchu, jaki zachodzi w obrębie każdego pojedyńczego okresu, jest zupełnie dowolny, tak że pod tym względem pozostaje możliwość nieskończonej różnorodności ruchów dźwiękowych.

Jako przykłady ruchu okresowego przytacza autor ruch wahadła oraz podobny do niego, lecz znacznie szybszy ruch widełek strojowych; inne przykłady — to ruch młota, poruszanego przez koło wodne, lub ruch piłki, podrzucanej wciąż pionowo w górę.

Aby prawo takich ruchów unaocznić lepiej, niżby to zdołał uczynić obszerny opis, matematycy i fizycy zwykli stosować metodę graficzną, do której i my będziemy zniewoleni często się uciekać.

Dla wszystkich ciał drgających możemy wykreślić krzywe, jeśli znamy prawo ich ruchu, t. j. jeśli wiemy, o ile punkt drgający wychyla się ze swego położenia równowagi w chwili dowolnie obranej. Tak np. rys. 39 przedstawia ruch młota, podnoszonego przez koło wodne, lub punktu struny skrzypcowej, pociąganej przez smyczek; w przeciągu pierwszych dziewięciu części czasu wznosi się on powoli i stopniowo, a podczas dziesiątej nagle zeskakuje.



Rys. 39.

Fizycy, myśląc o postaci tych krzywych, wyobrażających prawo ruchu ciała dźwięczącego, mówią wprost o postaci drgań ciała i twierdzą, że od postaci drgań zależy barwa dźwięku. W dalszym ciągu zbadamy bliżej to mniemanie, które dotąd opierało się na tem tylko, że wiedziano, iż barwa dźwięku nie może zależeć ani od częstości, ani od obszerności lub siły drgań.

Jeśli zbadać dokładnie i uważnie wpływ na ucho różnych postaci fali, — takiej np., jak na rys. 39, która odpowiada drganiu struny skrzypcowej, to dojdziemy do faktu dziwnego i niespodziewanego, znanego wprawdzie oddawna oddzielnym muzykom i fizykom, ale uważanego przeważnie za curiosum, gdyż nie znano jego powszechności oraz wielkiego znaczenia dla wszystkich zjawisk dźwiękowych. Oto ucho, które napotyka takie drgania, słyszy przy dostatecznie wytężonej uwadze nie tylko ten ton, którego wysokość jest określona przez czas drgania, lecz prócz niego słyszy nadto cały szereg wyższych tonów, które nazywamy t o n a m i h a r m o n i c z n y m i w y ż s z y m i dźwięku, w przeciwstawieniu do owego pierwszego tonu, t o n u z a s a d n i c z e g o; ten ton jest z nich wszystkich najniższy i zwykle też najsilniejszy, i według jego wysokości oceniamy wysokość całego dźwięku. Szereg tych tonów wyższych jest taki sam dla wszystkich dźwięków muzycznych.

Częstości drgań tych tonów są 2, 3, 4, 5 i t. d. razy większe od częstości drgań tonu zasadniczego.

Całkowite wrażenie, jakie w uchu wytwarza okresowe wstrząśnienie powietrza, nazwaliśmy dźwiękiem. Teraz widzimy, że zawiera on w sobie szereg różnych tonów, które nazwiemy t o n a m i c z ą s t k o w y m i lub s k ł a d o w y m i dźwięku. Pierwszy z nich to ton zasadniczy, pozostałe to jego tony harmoniczne wyższe. Numer porządkowy każdego z tonów cząstkowych wskazuje, ile razy częstość jego jest większa od częstości tonu zasadniczego. Więc drugi ton cząstkowy odpowiada dwa razy, trzeci — trzy razy większej liczbie drgań, niż ton zasadniczy i t. d.

G. S. O h m pierwszy to utrzymywał i wypowiedział twierdzenie, że istnieje jedna tylko postać drgań, której dźwięk nie zawiera wcale tonów harmonicznych, której jedyną część składową stanowi ton za-



Rys. 40.

sadniczy. Jest to ta postać drgań, którą opisaliśmy wyżej, jako właściwą wahadłu i widełkom strojowym, a która jest wyobrażona na rys. 40. Nazwiemy ją d r g a n i e m w a h a d ł o w e m lub też, ponie-

waż dźwięk jej nie zdradza obecności różnych tonów, nazwiemy ją drganiem prostem[1]).

Ponieważ, jakieśmy widzieli, barwa dźwięku zależy od postaci drgań, a przez postać określa się też istnienie tonów harmonicznych, będziemy się przeto musieli zapytać, o ile różnice w barwie dźwięków polegają na różnorodnych skojarzeniach tonu zasadniczego z tonami harmonicznymi rozmaitej siły.

Składanie drgań.

Gdy kilka ciał dźwięczących wzbudza w otaczającej nas przestrzeni powietrznej jednocześnie kilka układów fal głosowych, to zarówno zmiany gęstości powietrza, jak i przesunięcia i szybkości cząsteczek powietrza wewnątrz narządu słuchowego są równe sumie odpowiednich zmian, przesunięć i szybkości, jakieby wywołały poszczególne fale głosowe oddzielnie wzięte, i w tem znaczeniu możemy powiedzieć, że oddzielne drgania, jakieby wywołały poszczególne fale, istnieją w naszym narządzie słuchowym jednocześnie obok siebie, nie przeszkadzając sobie nawzajem.

Jak zachowuje się ucho wobec takiego ruchu powietrza? Rozkłada go, czy też nie rozkłada? Doświadczenie poucza, że jeśli dwie pary widełek strojowych brzmią w oktawie lub duodecymie, ucho potrafi bardzo dobrze odróżnić od siebie ich tony, choć rozróżnienie to jest nieco trudniejsze, niż przy innych interwałach. Jeśli jednak ucho jest w stanie rozłożyć takie spółbrzmienie dwóch par widełek, to niepodobna, aby nie wykonało tej samej analizy, jeśli ten sam ruch powietrza będzie wywołany przez jeden tylko flet, lub piszczałkę organów. I to dzieje się w istocie; dźwięk takiego narzędzia muzycznego, prosty sam przez się, pochodzący z jednego źródła, rozkłada się, jakieśmy to już przytoczyli, na tony cząstkowe: na ton zasadniczy i, jak w naszych przykładach, na jeden ton harmoniczny wyższy.

Prawidło, według którego ucho dokonywa tej analizy, pierwszy wypowiedział w sposób ogólny G. S. Ohm... Każdy ruch powietrza, który odpowiada zbiorowi dźwięków, należy rozłożyć na sumę prostych drgań waha-

[1]) [Obecnie drgania takie, których wykres jest sinusoidą, nazywamy drganiami harmonicznemi lub sinusoidalnemi. Ruch wahadłowy nie jest, biorąc ściśle, ruchem harmonicznym, lecz bliża się do niego, gdy amplituda jego jest bardzo mała].

dłowych, a każdemu takiemu drganiu prostemu odpowiada wyczuwany przez ucho ton, którego wysokość jest wyznaczona przez czas drgania odpowiadającego mu ruchu powietrza.

Różnorodność postaci drgań, jakie można otrzymać w ten sposób przez składanie drgań wahadłowych, jest nietylko nieograniczenie wielką, ale jest tak wielką, że większą już być nie może. Mianowicie słynny matematyk francuski Fourier dowiódł prawa matematycznego, które tak możemy wypowiedzieć w zastosowaniu do rozpatrywanego przedmiotu:

Każdy ruch drgający powietrza w organie słuchowym, odpowiadający dźwiękowi muzycznemu, można przedstawić zawsze i to w jeden tylko sposób — jako sumę pewnej liczby ruchów drgających prostych, które odpowiadają tonom cząstkowym tego dźwięku.

Analiza dźwięków zapomocą oddźwięku.

Zamierzamy teraz dowieść, że proste tony cząstkowe, zawarte w dźwięku złożonym, sprawiają w świecie otaczającym działania mechaniczne, niezależne od ucha ludzkiego i jego wrażeń, niezależne również od rozważań czysto teoretycznych; te działania nadają więc temu szczególnemu sposobowi rozkładania postaci drgań na drgania wahadłowe znaczenie szczególne i charakter objektywny.

Takie działanie zachodzi w zjawisku oddźwięku. Zachodzi ono we wszystkich tych ciałach, które, wprawione w drganie pod wpływem dowolnego impulsu, wykonywują dłuższy szereg drgań, zanim dojdą do spoczynku. Gdy więc takie ciała podlegają uderzeniom bardzo słabym, ale prawidłowo okresowym, z których każde zbyt jest nieznaczne, aby wywołać dostrzegalny ruch zdolnego do drgań ciała, to mogą jednak powstać bardzo silne i obszerne drgania takich ciał, jeśli okres tych słabych impulsów jest dokładnie równy okresowi drgań własnych ciała.

Takie impulsy okresowe pochodzą zazwyczaj od innego ciała, wykonywującego drgania prawidłowe; wówczas drgania drugiego z wymienionych ciał wywołują po pewnym czasie drgania pierwszego. W tych warunkach nazywamy to zjawisko rezonansem lub oddźwiękiem.

Jeśli nacisnąć lekko klawisz fortepianu tak, aby nie uderzyć struny, a tylko uwolnić ją od tłumika, i zaśpiewać silnie ton tej struny

we wnętrze fortepianu, to, po przerwaniu śpiewu, słyszy się ten ton rozbrzmiewający z fortepianu; jeśli puścić klawisz tak, że tłumik opada na strunę — brzmienie ustaje.

Przy tem doświadczeniu fale powietrza, wzbudzone ludzkim głosem, napotykają najpierw dekę rezonansową; ta przewodzi wstrząśnienie, udzielone jej przez poruszone śpiewem powietrze, najsamprzód do punktów przytwierdzenia strun, którym tych wstrząśnień udziela. Wielkość każdego oddzielnego wstrząśnienia jest wprawdzie znikomo mała; działania długiego ich szeregu muszą się dodawać, aby z nich mógł powstać dostrzegalny ruch struny; takie ustawiczne sumowanie działań istotnie zachodzi, gdy okres drobnych wstrząśnień, udzielanych strunom przez powietrze za pośrednictwem deki rezonansowej, odpowiada dokładnie okresowi drgań własnych struny.

Zamiast głosu ludzkiego możemy zresztą użyć dźwięków, wydobytych z dowolnego narzędzia muzycznego. Zamiast fortepianu możemy wziąć skrzypce, gitarę, harfę lub jakie inne narzędzie z pudłem rezonansowem, a także napięte błony, dzwony, płytki sprężyste i t. d.

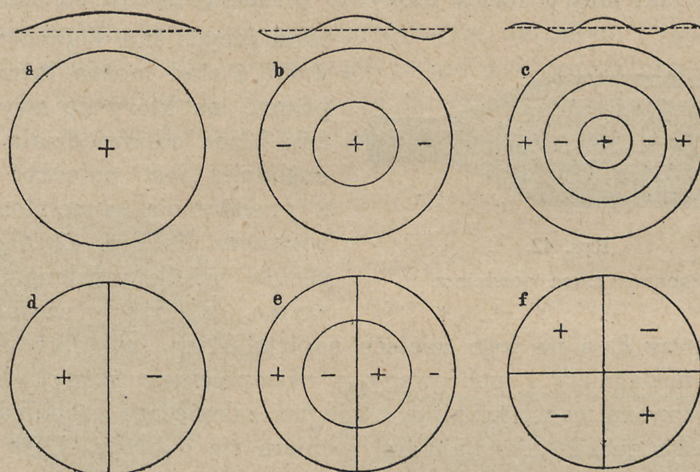
Po opisaniu w ten sposób zjawiska oddźwięku wogóle, musimy zbadać wpływ różnych postaci fal dźwiękowych na to zjawisko.

Zauważymy najsamprzód, że większość ciał sprężystych, pobudzonych przez jakąkolwiek słabą, okresowo działającą siłę do ustawicznych drgań, zawsze wpada w drgania wahadłowe. Przeważnie jednak ciała mogą wykonywać kilka rodzajów takich drgań, różniących się zarówno czasem wahania, jak i sposobem, w jaki drgania rozkładają się na rozmaite części ciała drgającego. Różnym wartościom czasu wahania odpowiadają więc różne tony, które takie ciało sprężyste może wytwarzać, czyli t. zw. tony własne ciała; wyjątkowo tylko, np. w strunach i wąskich piszczałkach organowych, odpowiadają one pod względem wysokości tonu wyższym tonom harmonicznym dźwięku muzycznego, o których mówiliśmy poprzednio; przeważnie tony te są nieharmoniczne w stosunku do tonu zasadniczego.

Często można uwidocznić drgania i rozkład ich na powierzchni ciała drgającego, posypując to ciało niewielką ilością drobnego piasku. Weźmy np. błonę (pęcherz zwierzęcy, albo cienką błonę kauczukową), napiętą na kolistym pierścieniu. Na rys. 41 są wyobrażone rozmaite postaci, jakie błona może przyjmować przy drganiu. Koła i średnice na powierzchni błony wyobrażają punkty, które pozostają w spoczynku podczas drgań; są to t. zw. linje węzłowe[1].

[1]) [Otrzymane figury są to t. zw. figury Chladni'ego (ob. str. 151)].

Dzielą one powierzchnię na pewną liczbę oddzielnych części, z których każda wygina się kolejno w górę i na dół i to tak, że, gdy części oznaczone znakiem + wychylają się do góry, części oznaczone znakiem — wyginają się na dół. Nad rysunkami *a*, *b*, *c* są wyrysowane kształty, jakieby przyjmował przekrój błony podczas ruchu.



Rys. 41.
Linje węzłowe drgającej błony.

Przez posypanie piaskiem można uwidocznić wyrysowane kształty drgań: gdy błona zaczyna drgać, piasek zbiera się na linjach węzłowych [por. Weberowie, str. 149].

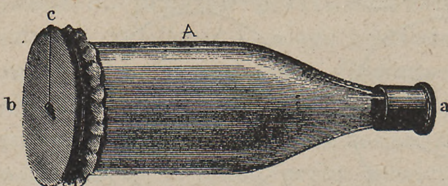
W czasie, w którym błona wykonywa 100 drgań o kształcie *a*, ilość drgań o innym kształcie jest następująca:

Kształt drgań	Częstość drgań	Wysokość tonu
a bez linij węzłowych	100	*c*
b o jednem kole	229,6	*d'*+
c o dwóch kołach	359,9	*b'*+
d o jednej średnicy	159	*as*
e o jednej średnicy i jednem kole	292	*g'*—
f o dwóch średnicach	214	*cis'*

Ton zasadniczy oznaczyłem w sposób dowolny przez *c*, jedynie w celu oznaczenia interwałów tonów wyższych. Tony, które w błonie są nieco wyższe, niż podana nuta, są oznaczone przez +, tony nieco

niższe przez —. Brak tu wszelkiego racjonalnego stosunku pomiędzy tonem zasadniczym, a tonami pozostałymi.

Jeśli taką błonę posypać cieniutko drobnym piaskiem i mocno wydobyć w pobliżu niej ton zasadniczy, to widać, jak piasek, wstrząsany przez drgania błony, mknie ku krawędzi i tam się skupia. Jeśli wydobyć jaki inny z tonów błony, to piasek gromadzi się na odpowiadających mu linjach węzłowych, i stąd można łatwo rozpoznać, na który ze swych tonów błona odpowiedziała. Najdogodniej jest połączyć błonę z przestrzenią, wypełnioną powietrzem. Na rys. 42 *A* przedstawia butelkę szklaną, której szyjka *a* jest otwarta, dno odcięte przy *b*, a na jego miejscu napięta błona (wilgotny pęcherz świński, naciągnięty i umocowany, a następnie wysuszony). Przy *c* jest umocowana na wosku nitka z kokonu, zakończona kropelką laku; ta kropelka zwisa, jak wahadło, i opiera się o błonę. Gdy błona wpada w drgania, wahadełko wykonywa gwałtowne skoki.



Rys. 42.
Rezonans słupa powietrza.

Taką błonę wprawiają w drgania nietylko dźwięki o wysokości tonu, równej wysokości tonu własnego błony, ale i takie, które zawierają ton własny błony, jako wyższy ton harmoniczny.

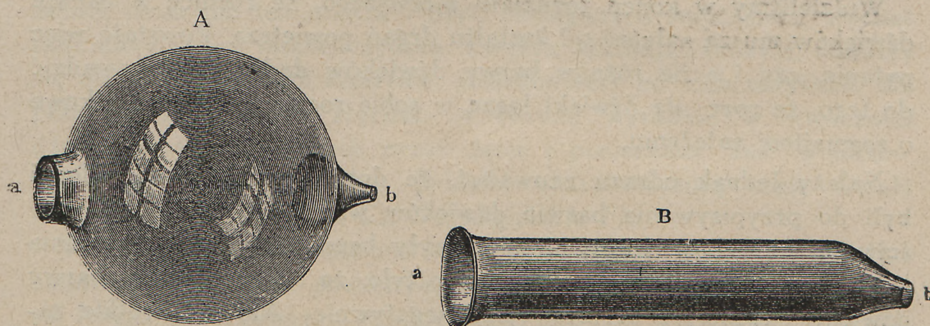
Okazuje się tu, że drgania wahadłowe, na jakie można rozłożyć zawiły ruch powietrza, mają zdolność działania na świat zewnętrzny niezależnie od ucha i niezależnie od teorji matematycznej. Przez to zostaje stwierdzone, że rozważania teoretyczne, które najpierw doprowadziły matematyków do tego sposobu rozkładania drgań złożonych, w naturze rzeczy znajdują swe uzasadnienie.

Przytaczam tu, jako przykład, opis jednego doświadczenia:

Butelka kształtu takiego, jak na rys. 42, 140 mm. wysoka, z naciągniętą cienką błoną z kauczuku wulkanizowanego, której część drgająca miała 49 mm. średnicy, posiadała obsadę mosiężną (*a*), a w niej otwór o 13 mm. średnicy: przy dęciu w nią dawała *fis'*, przyczem piasek gromadził się na kole blisko krawędzi błony. To samo koło tworzyło się, gdy brałem na fisharmonji ten sam ton *fis'* albo jego niższą oktawę *fis* [stosunek częstości 1 : 2], albo niższą duodecymę *H* [1 : 3]; *Fis* i *D* [1 : 4 i 1 : 5] dawały to samo koło, lecz słabiej. Owo *fis'* błony było tonem zasadniczym dźwięku *fis'* fisharmonji, pierwszym wyższym tonem harmonicznym dźwięku *fis*, dru-

gim — *H*, trzecim — *Fis*, czwartym — *D*. Dlatego mogły wszystkie te nuty wprawiać błonę w drganie i to tego kształtu, jaki odpowiada jej tonowi najniższemu. Drugie, mniejsze koło o średnicy 19 mm. zostało wytworzone przez *h'*, słabiej przez *h*, ledwo dostrzegalnie przez niższą duodecymę *e*, a więc przez tony, których liczba drgań wynosi $^1/_2$ i $^1/_3$ liczby drgań *h*.

Takie napięte błony nadają się wybornie do takich i tym podobnych doświadczeń nad tonami cząstkowymi dźwięków złożonych. Mają one tę wielką zaletę, że przy ich stosowaniu nie używa się wcale ucha; ale są one niezbyt czułe na słabsze tony. Znacznie większą



Rys. 43.
Rezonatory.

czułość przedstawiają podane przezemnie r e z o n a t o r y. Są to puste kule lub rurki szklane o dwóch otworach, odwzorowane na rys. 43A i B. Jeden otwór *a* ma brzegi ostro obcięte, drugi *b* w postaci lejka jest tak ukształtowany, że można go włożyć do ucha. Ten drugi koniec oblepiam zwykle roztopionym lakiem, a gdy już ostygł na tyle, że można go bezkarnie dotykać palcami, ale jest jeszcze miękki, wciskam ten otwór rezonatora do kanału usznego. Lak kształtuje się wówczas zgodnie z wewnętrzną powierzchnią kanału, a gdy się następnie przykłada rurkę do ucha, zamyka je ona łatwo i zupełnie szczelnie. Taki rezonator jest naogół zupełnie podobny do powyżej opisanej butelki rezonansowej, jedynie zamiast użytej tam błony sztucznej tu występuje błona bębenkowa obserwatora.

Jeśli zatkać sobie jedno ucho (najlepiej zapomocą korka lakowego o kształcie, odpowiadającym kształtowi kanału usznego), a do drugiego włożyć taki rezonator, to większość tonów, powstających w otoczeniu, słyszymy znacznie bardziej stłumioną; jeśli natomiast zostanie wzięty ton własny rezonatora, to rozlega się on w uchu z potężną

siłą. To daje możność każdemu człowiekowi, nawet o słuchu tępym i muzykalnie zupełnie niewyrobionym, wysłuchania odpowiedniego, nawet słabego tonu z pomiędzy wielkiej liczby innych tonów; można nawet dostrzec, że ton rezonatora pojawia się w świście wiatru, dudnieniu wozu lub w szmerze wody. Wspomniane rezonatory stanowią bez porównania czulszy środek do tego celu, niż nastrojone błony.

O różnicach w muzycznej barwie dźwięków.

Widzieliśmy w końcu rozdziału pierwszego, że różnice w barwie dźwięków muszą zależeć od kształtu drgań powietrza. Powstaje więc pytanie, czy i o ile różnice barwy dźwięków dadzą się sprowadzić do tego, że rozmaite dźwięki łączą w sobie rozmaite tony cząstkowe o rozmaitem natężeniu.

Należy jednak odrazu zauważyć, że dotychczas badacze skłonni byli do przypisywania barwie dźwięków wszelkich możliwych właściwości dźwięków, które nie dotyczyły bezpośrednio ich natężenia i wysokości tonu; było to słusznem o tyle, że i samo pojęcie barwy dźwięku dawało się określić tylko negatywnie. Ale już krótkie zastanowienie wskazuje, że niektóre z tych właściwości zależą od sposobu, w jaki dźwięki powstają i zanikają. Sposoby powstawania i zamierania dźwięków są po części tak charakterystyczne, że w głosie ludzkim zostały oznaczone szeregiem oddzielnych liter. Należą tu mianowicie spółgłoski wybuchowe *B*, *D*, *G* i *P*, *T*, *K*.

Jak przy tych głoskach, tak i przy uderzaniu strun różnica dźwięku polega częściowo na szybkości, z jaką ton ginie. Gdy struny mają małą masę (struny z kiszek) i są umocowane na pudłach rezonansowych, łatwych do poruszenia (jak w skrzypcach, gitarze, cytrze), to drgania ich zamierają bardzo szybko po uderzeniu, ton jest suchy, krótki, bezdźwięczny, jak przy piccicato skrzypiec. Jeśli natomiast są metalowe, a więc o większej masie i silnem napięciu, umocowane na mocnych i ciężkich podstawkach, mało poddających się wstrząśnieniom, to powoli tylko przekazują swe drgania powietrzu i pudłu rezonansowemu; ich drgania trwają dłużej, ich dźwięk jest trwalszy i pełniejszy, jak np. w fortepianie, ale nawet w przybliżeniu nię tak silny i przenikliwy, jak przy uderzaniu z taką samą siłą strun, łatwo przekazujących swoje tony; z tego powodu dobrze wykonane piccicato instrumentów smyczkowych jest o wiele bardziej przenikliwe, niż ton fortepianu.

Mówiąc dalej o muzycznej barwie dźwięku, nie będziemy narazie zwracali uwagi na te właściwości, które zależą od powstawania i zanikania, a będziemy uwzględniali tylko właściwości dźwięków, trwających równomiernie.

Ale i przy trwaniu dźwięku o stałem i niezmiennem natężeniu dołączają się do niego, przy większości metod wydobywania go, szmery, jako wyraz mniejszych lub większych nieprawidłowości w ruchu powietrza. W dźwiękach instrumentów dętych, podtrzymywanych przez prąd powietrza, słychać zazwyczaj silniej lub słabiej szum i syczenie powietrza, rozbijającego się o ostre krawędzie otworu. Przy dźwięczeniu strun lub też prętów i płyt, pociąganych smyczkiem, słychać dość silny szmer tarcia smyczka. Zwykle, słuchając muzyki, staramy się nie dosłyszeć tych szmerów, abstrahujemy od nich umyślnie, ale przy bliższej uwadze słychać je bardzo wyraźnie w większości dźwięków, wydobywanych przez dęcie i pocieranie. Jak wiadomo, większość spółgłosek mowy ludzkiej charakteryzują takie trwałe szmery, np. *F*, *W*, *S*, *Sz*, *Cz*, *Dź*, angielskie *Th*.

W niniejszym rozdziale nie będziemy zwracali uwagi na wszelkie nieprawidłowe ruchy powietrza, na powstawanie i przerywanie głosu, i będziemy rozważali jedynie część dźwięku właściwie muzyczną, która odpowiada prawidłowo okresowemu, równomiernie trwającemu ruchowi powietrza, i będziemy się starali odnaleźć, jaki stosunek zachodzi pomiędzy składaniem dźwięków z oddzielnych tonów a barwą dźwięków. To, co z właściwości barwy dźwięku temu odpowiada, będziemy nazywali krótko muzyczną barwą dźwięku.

1. Dźwięki bez wyższych tonów harmonicznych.

Zaczynamy od tych dźwięków, które nie są złożone, lecz składają się z jednego tylko prostego tonu. Najczyściej i najłatwiej można je otrzymać, zbliżając uderzone widełki strojowe do otworu rury rezonansowej. Te tony są nadzwyczaj miękkie, nie zawierają w sobie nic ostrego lub szorstkiego; zdają się leżeć stosunkowo nisko, tak, że już te tony, które ze względu na swą wysokość odpowiadają niskim tonom głosu basowego, robią wrażenie szczególnej i niezwykłej głębokości; barwa dźwięku takich niskich tonów prostych jest też nieco głucha.

Ponieważ kształt fal prostych jest dany w zupełności, jeśli tylko jest dana ich obszerność, przeto tony proste mogą wykazywać różnice natężenia, ale nie — barwy muzycznej. Tony proste, którym towarzyszą tylko szmery powietrza, można też otrzymać przez dęcie

w pękate butelki. Jeśli będziemy abstrahowali od tarcia powietrza, to właściwa muzyczna barwa tych tonów jest istotnie taka sama, jak barwa tonów widełek strojowych.

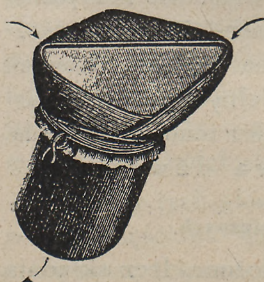
Dalszy ciąg rozdziału zawiera analizę sposobu powstawania dźwięków w narzędziach muzycznych różnych typów: strunowych, smyczkowych i dętych, oraz analizę barwy wytwarzanych przez nie dźwięków. Przytaczamy tu obszerniejsze wyjątki z ustępu, poświęconego dźwiękom piszczałek stroikowych.

6. Dźwięki piszczałek stroikowych.

Dźwięki instrumentów, należących do tego działu, są wzbudzane podobnie, jak dźwięki syreny: droga dla prądu powietrza kolejno otwiera się i zamyka, przez co sam prąd powietrza rozpada się na szereg oddzielnych impulsów.

Dokonywa się to zapomocą stroików: są to albo sprężyste języczki z metalu lub drzewa (harmonika, klarnet, obój, fagot), albo sprężyste, napięte błony.

S t r o i k i b ł o n o w e. Ich własności można najlepiej badać na umyślnie sporządzonych stroikach tego rodzaju. W tym celu ścina się ukośnie górny koniec rury drewnianej lub gutaperkowej z dwóch stron, jak na rys. 44, tak aby powstały dwa mniej więcej prostokątne ostrza pomiędzy obu ściętemi powierzchniami. Następnie na obie powierzchnie, przecinające się na podobieństwo dachu, naciąga się lekko paski wulkanizowanego kauczuku tak, aby pozostała pomiędzy nimi wąska szczelina, i obwiązuje się je nitką. W ten sposób powstaje munsztuk stroikowy, który można dowoli łączyć z rurami lub innymi zbiornikami. Gdy błony wyginają się nawewnątrz, wówczas zamykają szparę; wyginając się nazewnątrz, otwierają ją.



Rys. 44.
Stroik błonowy.

Jako instrumenty muzyczne, występują dwa tylko rodzaje takich stroików błonowych: w a r g i ludzkie przy dęciu w instrumenty blaszane, oraz k r t a ń ludzka przy śpiewie.

W krtani rolę stroika błonowego odgrywają struny głosowe. Są one napięte w kierunku od przodu do tyłu, podobnie jak błony kauczukowe (rys. 44), i pozostawiają pomiędzy sobą szczelinę — szparę głosową. Mają one tę wyższość nad wszelkimi sztucznie wytworzonymi stroikami, że szerokość szpary, napięcie błon, a nawet

ich kształt może być dowolnie zmieniany z niezwykłą szybkością i pewnością; do tego dołącza się jeszcze wielka zmienność rury nasadowej, którą tworzy jama ustna; można więc z krtani wydobyć znacznie większą różnorodność dźwięków, niż z jakiegokolwiek instrumentu sztucznego.

Przechodzimy teraz do naszego właściwego przedmiotu, do barwy dźwięków piszczałek stroikowych. Przez kolejne otwieranie i zamykanie kanału jednostajny przepływ powietrza zamienia się w ruch, powtarzający się okresowo, który może podrażnić ucho. Ten ruch powietrza, jak każdy ruch okresowy, może być rozłożony na szereg drgań prostych. Liczba wyrazów takiego szeregu jest tem większa, im mniej ciągłym jest ruch rozkładany. Ruch powietrza, przepływającego przez stroik lub syrenę, jest w wysokich stopniu nieciągły, gdyż poszczególne impulsy powietrza muszą być przedzielane zupełnemi pauzami w tym czasie, kiedy otwór jest zamknięty. Z tego powodu same stroiki bez rury nasadowej, przy których użyciu wszystkie oddzielne tony proste wzbudzonego przez nie ruchu powietrza przechodzą bezpośrednio do powietrza otaczającego, mają dźwięk bardzo ostry i chrapliwy; istotnie, słychać uchem uzbrojonem lub nieuzbrojonem długi szereg silnych i wyraźnych tonów wyższych aż do szesnastego lub dwudziestego, a nawet i wyższe tony istnieją oczywiście, choć odróżnić je od siebie trudno lub niepodobna, gdyż różnica między nimi jest mniejsza, niż pół tonu. Ten zamęt dysonujących tonów czyni dźwięki stroików swobodnych bardzo niemiłemi.

Dźwięk stroików zmienia się znacznie przez dołączenie rury nasadowej; mianowicie te wyższe tony harmoniczne, które odpowiadają tonom własnym rury nasadowej, wzmacniają się i występują wyraźnie.

Jako rurę nasadową do stroika mosiężnego, takiego, jak się używa przy organach, brzmiącego w tonie *b*, użyłem jednej z większych moich kul rezonansowych, nastrojonej również na *b*. Po znacznem wzmocnieniu ciśnienia w miechu stroik odezwał się głębiej, niż zwykle, ale otrzymałem dźwięk nadzwyczaj pełny, silny, ładny i miękki, prawie całkiem pozbawiony tonów wyższych. Potrzeba było do tego niewiele powietrza, ale o znacznem ciśnieniu. Tylko ton zasadniczy dźwięku brzmiał unisono ze szklaną rurą o silnym rezonansie; przez to ton ten stawał się potężny, a żaden z wyższych tonów harmonicznych nie mógł być wzmocniony.

Jeśli zamiast kuli szklanej używać innych rur nasadowych, posiadających większą liczbę tonów własnych, to otrzymuje się dźwięki bardziej złożone. W klarnecie mamy rurę cylindryczną, która wsku-

tek rezonansu wzmacnia tony wyższe nieparzyste dźwięku. Natomiast stożkowate rury obojów, fagotów, trąb i rożków wzmacniają wszystkie tony wyższe aż do pewnej wysokości; mianowicie dla fal dźwiękowych o długości, niewiele przewyższającej szerokość wylotu, rezonans rur ustaje. Istotnie, w dźwięku klarnetu znalazłem tylko tony wyższe nieparzyste, wyraźne aż do siódmego włącznie, podczas gdy dźwięki innych wymienionych instrumentów, o rurach stożkowych, zawierały i tony parzyste.

7. Dźwięki samogłosek.

Aby pojąć skład dźwięków samogłosek, należy najpierw uwzględnić, że źródło ich znajduje się w strunach głosowych, które przy silnie brzmiącym głosie działają jak stroiki błonowe — i, jak wszelkie stroiki, dają narazie szereg wyraźnie nieciągłych i ostro od siebie oddzielonych impulsów powietrza; te impulsy, jeśli je mamy uważać jako sumę drgań prostych, odpowiadają bardzo dużej liczbie takich drgań i stąd stanowią dla ucha jakby dźwięki, złożone z dość długiego szeregu wyższych tonów harmonicznych. Zapomocą kul rezonansowych można odróżnić bardzo wysokie tony harmoniczne, nawet do szesnastego, w niskich, silnie śpiewnych tonach basowych przy samogłoskach miękkich; przy bardziej wytężonem forte wyższych nut każdego głosu ludzkiego pojawiają się wyraźniej, niż w innych narzędziach muzycznych, wysokie tony harmoniczne ze środka oktawy czterokreślnej (najwyższej oktawy nowszych fortepianów).

Można przypuszczać, że w dźwiękach krtani ludzkiej, podobnie jak w dźwiękach innych instrumentów stroikowych, wyższe tony harmoniczne słabłyby stopniowo w miarę wzrastania ich wysokości, gdybyśmy je mogli obserwować bez rezonansu jamy ustnej. Ten stosunek zmienia się jednak zasadniczo wskutek rezonansu jamy ustnej. Im bardziej jama ustna się zwęża — czy to zapomocą warg, czy też języka — tem w sposób bardziej zdecydowany występuje jej rezonans dla tonów o zupełnie określonej wysokości i tem silniej wzmacnia on w dźwięku strun głosowych te tony wyższe, które się zbliżają do tonów o wysokości wyróżnionej; tem bardziej natomiast inne tony zostają stłumione. Stąd więc, przy badaniu brzmienia głosu ludzkiego zapomocą rezonatorów znajdujemy wprawdzie dość regularne występowanie pierwszych sześciu do ośmiu wyższych tonów harmonicznych, ale, zależnie od rozmaitych położeń jamy ustnej, o nader rozmaitem natężeniu; to rozbrzmiewają one potężnie w uchu, to zaledwie dają się słyszeć.

W tych warunkach zbadanie rezonansu w jamie ustnej jest rzeczą nadzwyczaj doniosłą. Najpewniejszą i najłatwiejszą metodą znalezienia tych tonów, na które jest nastrojona masa powietrza, zawarta w jamie ustnej przy jej rozmaitych układach, jakie przybiera dla wytworzenia rozmaitych samogłosek, jest ta sama metoda, jakiej się używa dla butelek i innych przestrzeni, wypełnionych powietrzem. Bierze się mianowicie drgające widełki strojowe o różnej wysokości tonu i ustawia się je przed wylotem przestrzeni powietrznej, w naszym wypadku przed otwartemi ustami; słyszymy przytem ton widełek tem głośniej, im dokładniej on odpowiada jednemu z tonów własnych zawartego w jamie ustnej powietrza. Ponieważ można dowoli zmieniać układ jamy ustnej, więc można ją zawsze przystosować do tonu danych widełek strojowych i w ten sposób można się przekonać, jaki układ należy nadać jamie ustnej, aby zawarte w niej powietrze było nastrojone na określony ton.

Rozporządzałem szeregiem widełek strojowych, przy pomocy których doszedłem przy takiem badaniu do następujących wyników.

Wysokość tonów najsilniejszego rezonansu w jamie ustnej zależy tylko od samogłoski, do wymówienia której złożono części składowe ust; zmienia się ona dość znacznie nawet przy małych zmianach barwy dźwięku samogłoski, jakie zachodzą np. w rozmaitych dialektach tego samego języka. Natomiast tony własne jamy ustnej są prawie niezależnie od wieku i płci. Naogół znajdowałem ten sam rezonans u mężczyzn, kobiet i dzieci. Czego brak dziecinnej lub kobiecej jamie ustnej pod względem obszerności, to może być łatwo zastąpione przez większe zwężenie wylotu, tak że rezonans może być równie niski, jak w większej jamie ustnej u mężczyzny.

Doświadczenie wykazuje, że przy *U*, przy wymawianiu którego jama ustna jest najszersza, a usta najwęższe, resonans jest też najniższy, odpowiada mianowicie *f*. Przy przechodzeniu od *U* do *O* wysokość rezonansu wzrasta stopniowo tak, że przy pełno dźwięczącem, czystem *O* strój jamy ustnej odpowiada *b'*. Układ ust przy O jest szczególnie korzystny dla rezonansu; otwór jest nie za wielki i nie za mały, a jama ustna dość obszerna.

Jeśli jamę ustną przeprowadzić stopniowo od układu dla *O* poprzez *Oa* i *Ao* do układu *A*, to rezonans wznosi się odpowiednio o oktawę aż do *b''*. Ten ton odpowiada północno - niemieckiemu *A*; nieco ostrzejsze *A* Włochów i Anglików wznosi się aż do tonu *d'''*, a więc jeszcze o tercję wyżej.
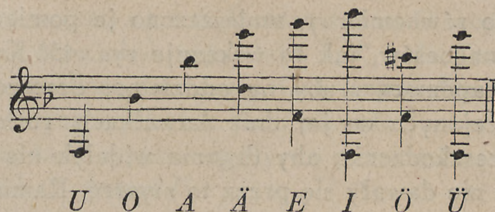
Przy samogłoskach dotąd wymienionych nie mogłem znaleźć drugiego tonu własnego, a zgodnie z analogją do zjawisk, jakie wykazują podobne, sztucznie wytworzone przestrzenie powietrzne, trudno oczekiwać, aby istniał taki ton o dostrzegalnem natężeniu. Poniżej przytoczone doświadczenia pokażą, że rezonans tego jednego tonu wystarcza w rzeczy samej do scharakteryzowania wspomnianych samogłosek.

Przy samogłoskach *Ä*, *E*, *I* kształt jamy ustnej staje się podobny do butelki o cienkiej szyjce, jaką tworzy wąski kanał pomiędzy językiem, a podniebieniem twardem.

Przy użyciu butelki, zakończonej wąską szyjką, jako przestrzeni rezonansowej, można łatwo znaleźć dwa tony, z których jeden można uważać za ton własny szerokiej części butelki, drugi — za ton jej szyjki. Samogłoski *Ä*, *E*, *I* mają zatem po jednym wyższym i po jednym niższym tonie rezonansowym. Tony wyższe stanowią dalszy ciąg szeregu tonów własnych samogłosek *U*, *O*, *A*. Zapomocą widełek strojowych znalazłem dla *Ä* ton g^{III} do as^{III}, dla *E* ton b^{III}. Dla *I* nie miałem odpowiednich widełek strojowych; pomóc tu jednak mogą szmery powietrza, o których zaraz pomówię, a te dają dość wyraźnie d^{IV}.

Tę metodę wykrywania tonów podał Holender Donders; polega ona na wymawianiu samogłosek szeptem; jama ustna wzmacnia te tony składowe szmeru, które odpowiadają jej tonowi własnemu, i te właśnie tony wprawne ucho może wysłuchać w szeptem wymówionej samogłosce; przy tej metodzie łatwo się jednak pomylić o oktawę.

Trudniej nieco wyznaczyć tony własne niższe, wytwarzane w tylnej części jamy ustnej. Można do tego używać widełek strojowych, ale rezonans jest względnie słaby, gdyż głos musi przechodzić przez długą i wąską szyjkę przestrzeni powietrznej. Znalazłem w ten sposób d^{I} dla *Ä*, f^{1} dla *E*. Dla *I* nie mogłem zaobserwować tonu bezpośrednio zapomocą widełek, ale na podstawie tonów wyższych wnioskuję, że leży on mniej więcej tak nisko, jak przy *U*, t. j. blisko *f*. Przy przechodzeniu od *A* do *I* niższe tony własne jamy ustnej obniżają się, podczas gdy wyższe się podnoszą. Możemy więc w następujący sposób wyrazić zapomocą nut rezonans jamy ustnej dla rozmaitych samogłosek:



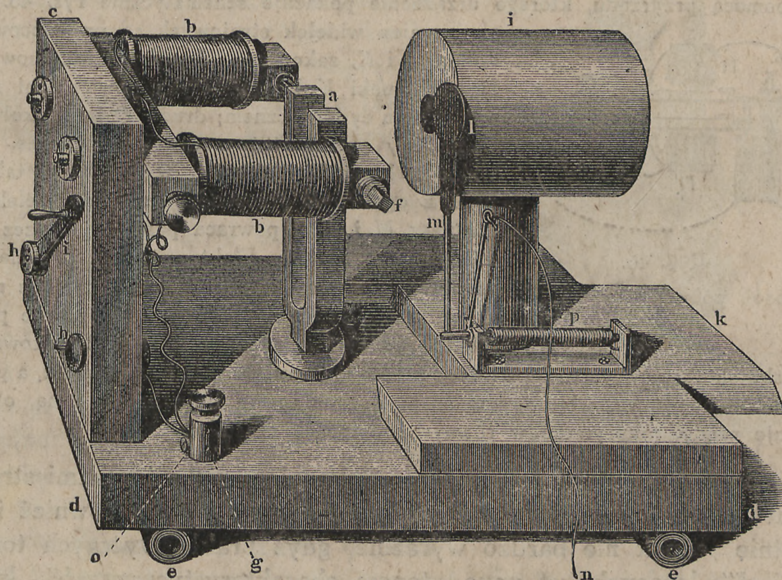
Rys. 47.

Wpływ, jaki wywiera dostrojenie jamy ustnej na barwę dźwięku głosu, jest taki sam, jak ten, któryśmy już poznali przy piszczałkach stroikowych, sztucznie zbudowanych. Mianowicie są wzmacniane wszystkie te tony harmoniczne wyższe, które zgadzają się z tonem własnym jamy ustnej lub przynajmniej są doń dostatecznie bliskie, podczas gdy inne tony wyższe zostają mniej lub więcej stłumione.

O dostrzeganiu barwy dźwięku.

(Odtwarzanie dźwięku samogłosek)

Bardzo czyste tony proste, których natężenie i różnica faz dają się regulować dokładnie, najlepiej otrzymywać z widełek strojowych,



Rys. 45.

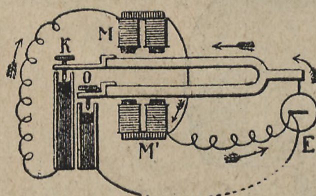
Przyrząd Helmholtza do odtwarzania dźwięku samogłosek.

których ton jest wzmacniany i przekazywany atmosferze powietrznej zapomocą rury rezonansowej. Aby widełki wprawiać w ruch nie-

ustanny i bardzo równomierny, umieszczono je pomiędzy ramionami małych elektromagnesów, jak to wskazuje rys. 45. Każde widełki *a* były osadzone zapomocą śruby na oddzielnej deseczce *dd*, spoczywającej na naklejonych na jej dnie kawałkach rurki gumowej *ee*, a to w celu przeszkodzenia, aby drgania widełek nie przenosiły się wprost na stół i nie dawały się przez to słyszeć. Ramiona elektromagnesu z nawiniętym na nie drutem są oznaczone przez *bb*; jego bieguny, zwrócone ku widełkom strojowym — przez *f*. Na deseczce poziomej *dd* znajdują się dwa zaciski *g*, połączone ze zwojami elektromagnesu; służą one do przytwierdzenia drutów, przez które doprowadza się prądy elektryczne. Aby widełki wprowadzić w żywe drgania, prądy te muszą posiadać natężenie okresowo zmienne.

Słabo słyszany głos widełek można wzmocnić przez zbliżenie dostrojonego rezonatora *i*; przysuwa się go możliwie blisko widełek. Otwór rezonatora może być całkowicie lub częściowo zasłonięty pokrywką *l*, poruszaną zapomocą dźwigni *m*, połączonej sznurkiem z klawiszami małej klawiatury. Zasłaniając lub odsłaniając otwór, można regulować natężenie tonu, wzmocnionego przez rezonator.

Prądy okresowe, potrzebne do poruszania widełek strojowych, otrzymywano zapomocą przyrządu, którego urządzenie pokazuje schematycznie rys. 46. Do obu ramion widełek strojowych są przymocowane śrubki *O* i *K*, zakończone drucikami platynowymi. Drucik śrubki *K* ledwo dotyka powierzchni rtęci w naczyniu cylindrycznem; drucik *O* jest cokolwiek wzniesiony ponad rtęć w drugim cylindrze. Jak widać z kierunków drutów, w położeniu takiem prąd z ogniwa *E* przechodzi przez dwa elektromagnesy *M* i *M'* i powraca przez *K* i przez kamerton do ogniwa. Elektromagnesy przyciągają wówczas ramiona widełek, *K* wynurza się z rtęci, *O* się w nią pogrąża, i prąd płynie już nie przez elektromagnesy, lecz wzdłuż linji kropkowanej. Wskutek okresowego ruchu widełek proces ten powtarza się perjodycznie, a przyrząd rezonansowy, włączony w miejscu, oznaczonem linją kropkowaną, otrzymuje prądy, przerywane w równych odstępach czasu.



Rys. 46.
Sposób pobudzania widełek jowych.

Pierwszego szeregu doświadczeń dokonałem z 8 widełkami strojowemi od *B* do *b''*. Można było odtworzyć *U*, *O*, *Ö*, a również i *A*, ostatnie jednak nie bardzo wyraźnie, gdyż brakło wyższych tonów *c'''* i *d'''*, leżących tuż ponad tonem charakterystycznym *b''*, które w dźwięku naturalnym tej samogłoski są też jeszcze wyraźnie wzmacniane. Ton zasadniczy *B* tego szeregu, wzięty oddzielnie, dawał bardzo głuche *U*, znacznie bardziej głuche, niż można otrzymać w mowie. Dźwięk stawał się podobniejszy do *U*, gdy się dodawało słabo

drugi i trzeci ton wyższy: *b* i *f'*. Bardzo ładne *O* można było otrzymać, biorąc silnie *b'*, a obok tego słabo *b*, *f'* i *d''*. Ton zasadniczy *B* musiał być przytem nieco stłumiony. Gdy zmieniałem wówczas nagle położenie rur rezonansowych, tak, że *B* stawało się bardzo silnem, natomiast wszystkie tony wyższe słabły, to przyrząd wymawiał bardzo wyraźnie naprzód *O*, potem *U*.

Ten przyrząd służył Helmholtz'owi do wykazania, że te same tony, o tem samem natężeniu wytwarzają zawsze ten sam dźwięk złożony, niezależnie od tego, czy rozpoczynają się jednocześnie, czy też fazy ich są przesunięte jedna względem drugiej.

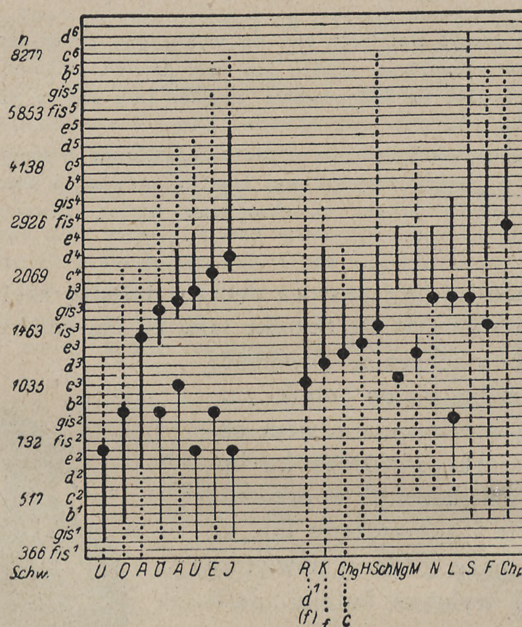
Bardzo proste doświadczenie na syntezę samogłosek z tonów prostych opisuje Helmholtz w innem miejscu swej książki, mówiąc o trudnościach, jakie nastręcza rozróżnianie uchem nieuzbrojonem tonów, zawartych w dźwięku złożonym.

Najlepiej udaje się to zapomocą dęcia w butelkę szklaną o kształcie, wyobrażonym na rys. 48; butelkę taką można bardzo łatwo przystosować do doświadczenia. Zapomocą pręta *c* przytwierdza się do butelki rurkę gutaperkową *a* w odpowiedniem położeniu. Wylot rurki, zwrócony ku butelce, został zmiękczony poprzednio w ciepłej wodzie i spłaszczony tak, że tworzy wąską szparę, z której powietrze wypływa ponad wylotem butelki. Jeśli rurkę połączyć zapomocą kiszki gumowej z miechem i dąć w butelkę, to wydaje ona głuchy ton, podobny do samogłoski *U*. Jednę taką większą butelkę nastroiłem na *b*, drugą mniejszą na *b'* i połączyłem je z tym samym miechem tak, że przy poruszeniu miecha odzywały się jednocześnie. Obie razem w ten sposób połączone dawały dźwięk o tonie *b*, t. j. o tonie butelki niżej nastrojonej, ale o barwie dźwięku samogłoski *O*. Zaciskając to jednę to drugą kiszkę gumową tak, że słyszałem oba tony oddzielnie jeden po drugim, byłem w stanie rozróżniać je, gdy brzmiały razem; ale nie trwało to długo: ton wyższy zlewał się stopniowo z niższym.



Rys. 48.
Imitacja samogłosek.

Dalsze badania naogół potwierdziły teorję samogłosek Helmholtza; używano do nich ulepszonych metod eksperymentalnych: czułych płomieni, rejestrowania na ruchomym walcu ruchów ostrza, umieszczonego na napiętej błonie (fonoautograf E. L. Scott'a, 1859), fonografu Edison'a (1877), fotografji.



Rys. 49.
Formanty samogłosek i spółgłosek.

Zjawiska okazały się jednak bardziej złożone, niż pierwotna teorja przypuszczała; charakterystyczne tony, czyli formanty (Herman, 1889), nie mają ściśle określonej wysokości, lecz wahają się w pewnych granicach. Rys. 49 wskazuje położenie formant dla niektórych samogłosek i spółgłosek, według pracy C. Stumpf'a (1921). Możliwość wahań wysokości formanty tłumaczy, dlaczego np. szybszy lub wolniejszy obrót płyt gramofonowych w pewnych granicach nie zmienia brzmienia śpiewanych i mówionych samogłosek.

C I E P Ł O

OPRACOWAŁ

M. GROTOWSKI

TERMOMETRJA. — SKRAPLANIE GAZÓW. — KALORYMETRJA. —
ZASADY TERMODYNAMIKI.

Rozdział I.

TERMOMETRJA.

POCZĄTKI termometrji. — Pojęcie temperatury, jako wielkości, wyznaczającej stan cieplny ciała, istniało w dość, coprawda, mglistych zarysach bodaj od chwili pierwszych badań nad zjawiskami cieplnemi. O zmianie objętości ciał przy nagrzewaniu wiedzieli już przyrodnicy greccy—Filon z Byzancjum (w 3-im wieku przed nar. Chr.) i znacznie późniejszy od niego słynny wynalazca Heron aleksandryjski (p. str. 15), który z powodzeniem korzystał z wielkiej rozszerzalności powietrza przy wprawianiu w ruch różnych mechanizmów.

Dopiero jednak Galileuszowi zawdzięczamy myśl użycia zmiany objętości za wskaźnik zmiany stanu cieplnego ciał (1592 r.) [1]. Termometr Galileusza (patrz str. 43) był termometrem powietrznym. Zasadniczą jego część stanowiła rurka szklana, zakończona niewielką kulą, wypełnioną powietrzem. Rurka otwartym swym końcem była zanurzona do naczynia z cieczą tak, że ciecz częściowo wypełniała rurkę, stojąc w niej naogół na wyższym poziomie, niż w naczyniu. Wysokość słupa cieczy w rurze można było odczytać na podziałce, całkowicie zresztą dowolnej, naciętej na rurce. Główną wadą tego przyrządu była zależność jego wskazań od ciśnienia atmosferycznego, co utrudniało w wysokim stopniu porównywanie otrzymanych przy jego pomocy wyników, tembardziej, że barometr był wówczas jeszcze nieznany. Ale i w tej niedoskonałej postaci oddawał on już pewne usługi. Słynny padewski lekarz Sanctorius używał go do mierzenia gorączki i próbował przy jego pomocy porównać promieniowanie słońca i księżyca; uczeń Galileusza Sagredo stwierdził że, wbrew powszechnemu mniemaniu, woda w studni jest w lecie o wiele cieplejsza, niż w zimie.

---

[1]) Hoppe w swej „Geschichte der Physik", Springer, Berlin, 1926, str. 30 twierdzi, że Galileusz używał termoskopu Filona, który dzięki dziełu Herona, zawierającemu jego opis, dobrze był we Włoszech znany.

Sturm (1676 r.) przez nadanie nieco innej postaci termometrowi Galileusza potrafił usunąć wpływ ciśnienia zewnętrznego. W termometrze Sturma rurka, wypełniona częściowo cieczą, była wygięta w kształt literu U, o dwu niejednakowej długości ramionach. Zakończenie tych ramion stanowiły kule szklane, wypełnione powietrzem. Przy ogrzewaniu kuli, znajdującej się na końcu ramienia krótszego, ciecz podnosiła się w ramieniu dłuższem. Jednak i ten typ — termometru różnicowego, jakbyśmy go dzisiaj nazwali — był niedogodny w codziennym użytku. To też termometr powietrzny wychodził stopniowo z użycia i wreszcie w 18-ym wieku został prawie całkowicie wyrugowany przez termometry, oparte na pozornej rozszerzalności cieczy. Dopiero podjęcie dociekań Amontonsa (p. niżej) przez Charles'a (p. niżej) i Gay-Lussaca (p. niżej) zwróciło znów na niego uwagę fizyków.

Już najbliżsi duchowi spadkobiercy Galileusza florenccy uczeni, zgrupowani w słynnej Accademia del Cimento, używali termometrów, wypełnionych cieczą. Wynalazek takiego termometru fama przypisywała Ferdynandowi II-mu, wielkiemu księciu toskańskiemu (1621—1690 r.). W jakim stopniu wynalazek ten był owocem jego własnego wysiłku, a jaką rolę odegrała tu współpraca fizyków florenckich, trudno powiedzieć. Wiadomo tylko, że cieczą, używaną początkowo do napełniania termometrów, była woda, zastąpiona później przez alkohol. Najstarsze termometry tego typu pokazywały 20 stopni przy zanurzeniu w śniegu, 80 w czasie upałów letnich. Szczegóły budowy i podziałka tych termometrów były wielokrotnie przez akademików zmieniane. W pracy Réaumura, którą niżej omówimy nieco obszerniej, znajdujemy następujący opis tego rodzaju termometrów [1].

„Używamy obecnie termometrów bardzo prostej konstrukcji i przytem jednej z najstarszych, która też najwięcej bywa stosowana: mam na myśli tak zwany termometr florencki, który się wszędzie codziennie widuje. Składa się on z pustej, na górnym końcu szczelnie zamkniętej kuli szklanej, przytopionej do długiej rury szklanej. Jak wiadomo, kula i część rury szklanej są napełnione wyskokiem, zabarwionym na czerwono; gdy wzrasta ciepło w otoczeniu kuli, wtedy rozszerza się znajdujący się w niej wyskok i podnosi się w rurze szklanej; ta sama ciecz kurczy się, kiedy traci ciepło.

---

[1]) Wszystkie ustępy z prac Réaumura, Fahrenheita i Celsiusa przytoczone są według niemieckiego przekładu w „Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften" Nr. 57.

Rurka szklana jest przymocowana do cienkiej płytki, na której się umieszcza papier z wydrukowanemi stopniami. W ten sam sposób zadrukowany papier służy rozmaitym termometrom, jak gdyby ilość ich stopni była ta sama.

Z tej budowy wynika — i to jest doskonale znane — że, gdy następuje zmiana temperatury powietrza, w rozmaitych termometrach są przebiegane rozmaite stopnie, zarówno przy podnoszeniu się, jak i przy opadaniu, odpowiednio do stosunku między średnicą kuli i średnicą rury. Stąd staje się jasne, że niektóre termometry są mało czułe, inne zaś za bardzo; z braku przestrzeni ciśnienie rozszerzającej się cieczy tłucze czasami rurę lub kulę; w niektórych termometrach ciecz opada czasami zupełnie do kuli, zanim jeszcze nastąpi surowe zimno. Że w podobnych okolicznościach niemożliwe jest znalezienie termometru o proporcjonalnym biegu, jest rzeczą oczywistą, gdyż jest niemożliwe otrzymanie dwu zupełnie równych kul o równych średnicach i równem zaokrągleniu, — gdyż takie kule są zawsze niedoskonałe. Sporządzić rury oznaczonej średnicy jest niemniej trudno...

Jest jeszcze jedno źródło różnic, na które się niedostatecznie zwraca uwagę, przynajmniej mnie nie jest znany żaden środek zaradczy. Mam na myśli gatunek wyskoku, którym napełnia się kulę termometru. Ciecze bynajmniej nie rozszerzają się równomiernie przy równem ogrzaniu. O tem bardzo dobrze wiadomo, i naumyślnie wybrano wyskok, gdyż najczulej, z wyjątkiem powietrza, odczuwa ciepło i zimno. Wyskok rozszerza się znacznie silniej, niż woda. Najbardziej oczyszczony wyskok jest przecie jedynie mieszaniną palnej substancji, essencji lub oleju eterycznego z wodą... Silną rozszerzalność wyskoku... należy więc przypisać zawartemu w nim olejowi eterycznemu; im więcej go zawiera wyskok, tem silniej będzie się rozszerzał... Aż do dziś dnia napełniano termometry nie wyskokiem oznaczonej i znanej jakości, lecz używano wyskoku otrzymanego przypadkowo..."

Mimo tej ostrej i naogół usprawiedliwionej oceny ówczesnych termometrów, nie mógł jednak Réaumur zaprzeczyć, że

„termometry są, bezspornie, jednym z najpiękniejszych wynalazków współczesnej fizyki, które najwięcej przyczyniły się do jej postępów. One dostarczyły nam wielu ciekawych wiadomości, które bez ich pomocy wydawały się nieosiągalne. W ilu przypadkach moglibyśmy bez termometru stwierdzić, że zmieszane razem ciecze ogrzewają się? Bez termometru nigdybyśmy nie odkryli, że przy rozpu-

szczaniu pewnych soli zachodzi ochłodzenie i przy jakich solach ochłodzenie to jest najsilniejsze. Nie wiedzielibyśmy również, że jeden kawałek lodu zimniejszy, jest niż inny. Nie wiedzielibyśmy, że wrząca woda posiada temperaturę, powyżej której woda nie może być ogrzana".

To, też w pewnych warunkach ciała mogą posiadać stałą, zawsze wyniki porównywalne, nie ustawały, i już w początkach 18-go stulecia doprowadziły do czyniących zadość wymaganiom praktycznym termometrów Fahrenheita i Celsiusa, wycechowanych przy powocy dwu, a nawet, jak u Fahrenheita, trzech punktów stałej temperatury.

To, że w pewnych warunkach ciała mogą posiadać stałą, zawsze jednakową temperaturę było rzeczą, stwierdzoną stosunkowo dość późno. Na stałość punktu zamarzania olejku anyżowego zwrócił w 1665 r. uwagę Robert Boyle (p. Mechanika); niezmienność temperatury topniejącego śniegu i wrzącej wody ustalił nieco później Newton (p. Mechanika); Amontonsowi zawdzięczamy wyraźne i dokładne stwierdzenie stałości punktu wrzenia wody.

Fahrenheit do wycechowania swego termometru użył poza punktem zamarzania wody nie punktu jej wrzenia, lecz temperatury zamarzania wodnego roztworu salmiaku, o nieznanem zresztą stężeniu, i temperatury zdrowego człowieka. Ten dość dziwny wybór znajdował, być może, usprawiedliwienie w zastrzeżeniach, jakie Fahrenheit miał co do stałości temperatur wrzenia wody i topnienia lodu.

FAHRENHEIT (Daniel Gabryel) urodził się w Gdańsku w 1686 r. Był więc z tego tytułu obywatelem Rzeczypospolitej Polskiej. Nauki jednak pobierał w Holandji i tam na stałe osiadł. Z zawodu był szklarzem i utrzymywał się z budowania narzędzi meteorologicznych. Umarł w Amsterdamie w roku 1736, doczekawszy się uznania dla swej pracy ze strony „Towarzystwa Królewskiego" w Londynie, które go wybrało na swego członka.

W roku 1724 pomieścił w „Philosophical Transactions" 5 rozpraw. Pozostały one jedynemi drukowanemi jego pracami. Trzy z nich omawiały wyniki pomiarów, wykonanych przy użyciu nowego termometru. Opis tego termometru zawiera druga rozprawa, nosząca tytuł „Doświadczenia i spostrzeżenia nad zamarzaniem wody w próżni" i zawierająca ciekawe i barwne streszczenie wyników badań nad t. zw. przechłodzeniem wody.

„Między wielu zadziwiającemi zjawiskami przyrody krzepnięcie wód wydawało mi się zawsze rzeczą nie małej wagi; często pragnąłem zbadać, jakie byłoby działanie zimna, gdyby wodę umieścić w przestrzeni, pozbawionej powietrza. I ponieważ 2, 3 i 4 marca (starego stylu) 1721 roku sprzyjały takim doświadczeniom, w powyżej oznaczonych dniach były wykonane niżej pomieszczone spostrzeżenia i doświadczenia.

Zanim przejdę do opisu doświadczeń, muszę w kilku słowach wspomnieć o termometrach, które przygotowałem, jak również o podziale ich skali... Sporządziłem dwa rodzaje termometrów: jeden z nich był napełniony alkoholem, drugi rtęcią. Długość była, stosownie do celu, rozmaicie wybierana. Wszystkie są jednak pod tym względem podobne, że zgadzają się co do liczby stopni na skali i zawierają swoje zmiany w określonych granicach. Skala tych termometrów, które służą jedynie do spostrzeżeń meteorologicznych, zaczyna się u 0°, kończy się przy 96°. Ta skala oparta jest na wyznaczeniu trzech stałych punktów, które się otrzymuje w następujący sposób: pierwszy, najniższy, leży na początku skali i jest wyznaczony przez mieszaninę lodu, wody i salmiaku lub soli morskiej; jeżeli się zanurzy termometr w tę mieszaninę, to ciecz spada w dół do punktu, który jest oznaczony przez 0°. To doświadczenie udaje się lepiej w zimie, niż w lecie. Drugi punkt otrzymujemy, gdy zmieszamy wodę z lodem bez wspomnianej soli; gdy się pogrąży termometr w tę mieszaninę, ciecz stanie przy 32 stopniu i ten punkt nazywam punktem początkowym zamarzania, gdyż stojące wody powlekają się już cienką warstwą lodu, kiedy w zimie ciecz termometru dojdzie do tego stopnia. Trzeci punkt znajduje się przy 96 stopniu, i alkohol rozszerza się aż do tego stopnia, gdy się włoży termometr do ust lub pod pachę zdrowego człowieka i trzyma go się tam tak długo, aż przyjmie całkowicie temperaturę ciała.

Skala termometrów takich, które mają służyć do wyznaczania punktu wrzenia cieczy, zaczyna się również przy 0°, sięga jednak 600 stopni, gdyż w tej mniej więcej temperaturze rtęć (którą jest napełniony termometr) sama zaczyna wrzeć.

Aby termometr prędko odczuwał wpływ każdej zmiany temperatury, używałem zamiast kul walców szklanych, które, dzięki swej większej powierzchni, pozwalają ciepłu prędzej przepływać.

— — — — — — — — — — — — — —

Kula szklana [użyta do doświadczeń z wodą] miała w średnicy około cala. Gdy była opróżniona [z powietrza] i mniej więcej do

połowy napełniona wodą deszczową, poddałem ją działaniu zimna 2 marca 1721 roku. Temperatura powietrza według obok postawionego termometru wynosiła 15 stopni. Po upływie godziny znalazłem, że woda w kulce jest jeszcze płynna, i sądziłem, że zimno jeszcze niedostatecznie przeniknęło wodę; lecz, ażeby pozbyć się jakichkolwiek wątpliwości, zostawiłem kulkę przez całą noc na świeżem powietrzu. Następnego dnia, 3 marca, rano o 5-ej godzinie znalazłem, że woda ciągle jeszcze jest płynna, termometr jednak wskazywał tę samą temperaturę; przypisałem tedy to nieprzewidziane zjawisko nieobecności powietrza. Dla potwierdzenia prawdziwości tego objaśnienia złamałem koniec [rurki, połączonej z kulą], aby powietrze napowrót wpłynęło do środka; gdy się to stało, całą masę wodną poprzerzynały nadzwyczaj prędko cienkie blaszki lodu. Chciałem przed powtórzeniem doświadczenia stwierdzić zapomocą innego eksperymentu, czy te blaszki lodu pływałyby po wodzie; w tym celu rozbiłem kulkę i wysypałem trochę lodu do szklanki, napełnionej wodą; zobaczyłem, że pływają.

— — — — — — — — — — — — — —

Gorąco pragnąłem zbadać uważnie powstawanie blaszek w szklanem naczyniu, i gdy w tym celu przenosiłem naczynie z pokoju mieszkalnego do miejsca, gdzie były wykonywane doświadczenia, chciałem wejść po kilku stopniach, ale opuściłem jeden stopień tak, że naczynie zostało silnie wstrząśnięte, i w tej samej chwili całą masę wodną poprzerzynały blaszki lodu. Przy tem przypadkowem zdarzeniu dostrzegłem, że lód w dostatecznie zimnej wodzie może powstać przez wstrząśnienie, i bardzo pragnąłem następnego dnia ustalić zapomocą doświadczenia, czy również w próżni zamarzanie może powstać przez wstrząśnienie.

Gdy kulka była cokolwiek wstrząśnięta, ujrzałem, ku memu największemu zachwytowi, to samo widowisko i odrazu poznałem błędność mojego wniosku, w którym przypisałem stan ciekły nieobecności powietrza..."

Z badań tych wynikało, że w pewnych, do dziś zresztą niewyjaśnionych dokładnie warunkach, temperatura zamarzania wody może ulec znacznemu obniżeniu. Analogicznie i punkt wrzenia wody może, jak to wykazał F a h r e n h e i t, leżeć niekiedy wyżej, niekiedy niżej.

W pierwszej z wymienionych rozpraw p. t. „Badanie punktu wrzenia pewnych cieczy", w których podane są wyniki pomiarów tempe-

ratury wrzenia wody, alkoholu, kwasu azotowego i t. d., otrzymane przy pomocy nowego termometru, zaznacza Fahrenheit, że

„również i inne ciecze, nietylko woda i alkohol, mogą zmieniać swój punkt wrzenia, szczególniej, gdy się ich używa w dużej ilości i gotuje przez czas dłuższy".

Tem jednak zjawiskiem przegrzania cieczy, które znacznie później miało być dokładnie i szczegółowo badane przez Gay-Lussaca i następnie przez Marceta, Fahrenheit, jak się zdaje, gruntowniej się nie zajmował. Uwagę jego zwróciła zależność temperatury wrzenia od ciśnienia. Ostatnią (piątą) rozprawę p. t. „Opis nowego barometru (hypsobarometru)" rozpoczyna w sposób następujący:

„W sprawozdaniu z doświadczeń, dotyczących punktu wrzenia pewnych cieczy, wspomniałem, że w owym czasie punkt wrzenia wody wynosił 212 stopni; później stwierdziłem w różnych badaniach i doświadczeniach, że punkt ten, który jest stały przy tym samym ciężarze atmosfery, może jednak przy zmienionym ciężarze atmosfery zmieniać się w różnych kierunkach".

Ta zmienność punktu wrzenia pozwala, według Fahrenheita, zastosować barometr do wyznaczania wzniesienia ponad poziom morza. Opisem barometru, przystosowanego do tego nowego celu, kończy Fahrenheit ostatnią ze swych rozpraw, których znaczenie w historji termometrji praktycznej jest, niewątpliwie, bardzo duże.

Od zasad budowy termometru Fahrenheita niewiele odbiegała skala, obmyślona przez Celsiusa.

CELSIUS (Andreas), urodzony w 1701 r. w Upsali, zmarł tamże w 1744 r. Poza kilkoletniemi podróżami do Niemiec, Francji i Włoch nie opuszczał rodzinnego miasta, gdzie do zgonu zajmował katedrę astronomji na tamtejszym uniwersytecie. Oprócz prac astronomicznych pozostawił jeszcze drobne przyczynki z dziedziny meteorologji i magnetyzmu ziemskiego. W pracy, której wyjątki przytaczamy poniżej, daje on uzasadnienie swego sposobu cechowania termometrów.

Spostrzeżenia, dotyczące dwu stałych stopni na termometrze.

(Sprawozdania szwedzkiej Akademji, tom IV, 1742, str. 197—205).

„Najpowszechniejszemi są tak zwane termometry florenckie, które przychodzą do Szwecji z Niemiec i o tyle są zupełnie bezużyteczne, że nie dają żadnej określonej miary stopnia ciepła i zimna...

— — — — — — — — — — — — —

Co do mnie, to nie znajduję żadnego pewniejszego i wygodniejszego sposobu dzielenia termometru na stopnie, niż wyznaczenie pewnych punktów wysokości rtęci.

— — — — — — — — — — — — — —

Co się tyczy punktu zamarzania, to został on wyznaczony przez p. Réaumura przy ciepłej pogodzie zapomocą sztucznie wytworzonego zimna. Inni w zimie poddawali zimnu ciepłą wodę i zostawiali w niej termometr dopóty, dopóki woda nie zaczęła tężeć, a mianowicie, aż woda pokryła się z wierzchu skorupą. Chociaż ten sposób może nie bardzo chybiać, gdy jest wykonywany z uwagą, to jednak ja znalazłem, czemu nikt nie zaprzeczy, że woda ma jednaki stopień zimna, gdy tężeje lub zaczyna stawać się lodem i śniegiem, co i lód, który zaczyna na nowo stapiać się na wodę. Najdokładniej i najwygodniej daje się wyznaczyć punkt tężenia wody, gdy się zanurzy termometr w lepki śnieg przynajmniej na pół godziny. Co również już dawno zauważył pan Newton, jak to widać z Philosophical Transaction 270 N., gdzie bez wymienienia swego nazwiska podał tablicę rozmaitych stopni ciepła.

Badania te powtarzałem przez dwa lata w ciągu wszystkich zimowych miesięcy, przy wszelkiej pogodzie i przy rozmaitych zmianach barometru i zawsze znajdowałem dokładnie ten sam punkt na termometrze. Również nietylko zanurzałem, jak to pan Newton podaje, termometr w lepki śnieg, lecz także w czasie surowej zimy stawiałem w moim pokoju przy ogniu zimny śnieg, dopóki nie stał się lepkim. Wstawiłem również kocioł z lepkim śniegiem wraz z termometrem do nagrzanego pieca i za każdym razem znajdowałem, że wskazuje on jednaki punkt, dopóki śnieg gęsto leży przy kuli termometru.

— — — — — — — — — — — — — —

Co się tyczy drugiego punktu stałego, to jest rzeczą dostatecznie znaną, że woda nie pobiera więcej gorąca, gdy już raz zaczęła się gotować, dopóki pozostaje wrzącą; tak, że rtęć w termometrze zawsze wskazuje jednaki punkt.

To, co może sprawić, że punkt ten staje się zmiennym, polega głównie na dwu tylko przyczynach. Pierwsze, że woda naprzód zaczyna się gotować na dnie i stamtąd wysyła pęcherzyki do góry na całą powierzchnię; gdy się jednak nie podnoszą wysoko, to rtęć stoi stale na jednakiej wysokości; kiedy zaś ogień jest nagle pobudzony przy pomocy miechów tak, że pęcherzyki zaczynają bardzo hałasować i stają się bardzo duże oraz wysoko się podnoszą, i, gdy naczy-

nie jest prawie pełne, uchodzą za brzegi, wtedy podnosi się rtęć nieco wyżej i przytem stoi niespokojnie, dopóki trwa takie silne gotowanie. To również znalazł pan Newton, który mówi w przytoczonej tablicy: Woda zaczęła się gotować przy gorącu 33 stopni i nie mogła pobrać w siebie przez gotowanie silniejszego gorąca, jak 34 stopnie i pół tak, że przyjmuje on 34 stopnie dla gorącą wody, gdy się silnie gotuje (vehementer ebullit).

— — — — — — — — — — — — — —

Po drugie, to zmienia punkt gotującej się wody, że woda zużywa, zanim się zagotuje, więcej ciepła, gdy ciśnienie powietrza jest silniejsze, i odwrotnie. A że wysokość rtęci w barometrze jest w równowadze z ciężarem atmosfery, doświadczony mechanik w Amsterdamie Fahrenheit zauważył, że punkt gotującej się wody, przy którym staje rtęć w termometrze, zawsze jest proporcjonalny do wysokości rtęci w barometrze.

Ja też wykonałem bardzo dokładnie to zdumiewające doświadczenienie przy różnych wysokościach barometru i znalazłem, że przytoczone doświadczenia Fahrenheita są słuszne.

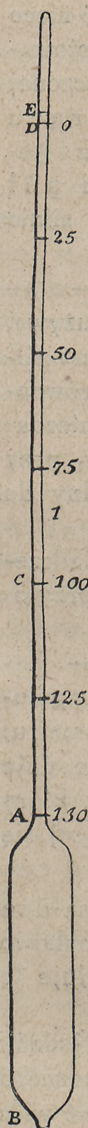
— — — — — — — — — — — — — —

Wynika stąd dostatecznie jasno, że wysokość termometru w gotującej się wodzie zawsze jest odpowiednia do wysokości barometru; mianowicie, że 8 punktów w termometrze, którym się posługuję, daje jeden geometryczny cal zmiany barometru tak, że termometr, który jest dość czuły, to znaczy ma duże stopnie, włożony do gotującej się wody, może również oddać te usługi, które oddaje barometr...

Jedyna rzecz, co zmienia ten stosunek na jeden, najwyżej na dwa grany[1]), zdaje się na tem polegać, że nie zawsze można jednakowo silnie zagotować wodę. Być może, że rozmaitość wody wywołuje tę małą różnicę...

Ale ponieważ różnica ta może być dokładniej zbadana, a jednak prawie nie przewyższa jednego grana, można więc bez znacznego błędu używać punktu gotowania jakiej się chce wody. Ponieważ więc punkt gotującej się wody powinien być stały, należy przeto wyznaczyć pewną wysokość barometru, z którą zawsze będzie związany. A ponieważ według wszystkich badań pogody, zarówno tu, w Szwecji, jak i gdziekolwiekbądź w Europie, przeciętna wysokość barometru wynosi mniej więcej 25 cali 3 linje, najlepiej przeto wziąć za stały

[1]) Gran — setna część cala.



Rys. 50.

ten punkt, który daje termometr przy omawianej wysokości barometru.

Gdy więc upewnimy się co do tych dwu stałych stopni, które w czułych termometrach znajdują się w znacznej od siebie odległości, możemy najlepiej wyznaczyć stopnie termometru w sposób następujący, przyczem jest się pewnym, że rozmaite takie termometry w jednakiem powietrzu zawsze wskazywać będą jednakowe stopnie.

1) Zanurza się walec szkła termometru *AB* (rys. 50) w lepki śnieg i zaznacza się dokładnie punkt tężejącej wody *C*, który musi być tak wysoko nad walcem w *A*, jak mniej więcej połowa odległości między punktem tężejącej wody *C* i gotującej się *D*.

2) Oznacza się punkt gotującej się wody *D* przy wysokości barometru 25 cali i 3 linje.

3) Długość *CD* dzieli się na sto równych części albo stopni tak, że 0 wypada przy *D*, a 100 przy *C*. Prowadzi się te stopnie pod *C* aż do *A*; wtedy jest termometr gotów" [1]).

Podobnie więc, jak i F a h r e n h e i t, używa C e l s i u s do wycechowania termometru punktów stałej temperatury. Rozprawa N e w t o n a, którą przytacza na poparcie swego założenia o stałości temperatur topnienia i wrzenia, zawierała wyniki długoletnich i rozległych badań N e w t o n a, wiążących się poniekąd z jego pracą nad teorją budowy wszechświata. W „Matematycznych zasadach filozofji przyrody" można znaleźć ustępy, gdzie temperatura wrzącej wody służy N e w t o n o w i za punkt porównawczy do wyznaczania innych temperatur.

„Gdyby ziemia znajdowała się na orbicie Saturna, woda nasza by zamarzła; gdyby na orbicie Merkurego — stale by przechodziła w parę. Światło bowiem słoneczne, do którego ciepło (calor) jest proporcjonalne, jest siedem razy gęstsze na orbicie Merkurego niż u nas: a przekonałem się (expertus

---

[1]) Skala C e l s i u s a została wkrótce odwrócona, jak się zdaje, przez S t r ö m e r a i E c k s t r ö m a, i to, być może, za wiedzą, zgodą, a nawet inicjatywą C e l s i u s a. W tej odwróconej skali 0° oznacza temperaturę zamarzania wody, 100° - temperaturę wody wrzącej.

sum) przy pomocy termometru, że woda wre przy cieple siedem razy większem od ciepła letniego słońca"[1]).

W drugim zaś z trzech rozdziałów, poświęconych kometom i stanowiącym zakończenie księgi trzeciej i ostatniej „Zasad", Newton pisze:

„Ciepło wody wrzącej jest, jakem się o tem przekonał, prawie trzy razy większe od ciepła, które pobiera sucha ziemia przy letniem słońcu; ciepło zaś rozżarzonego żelaza jest (o ile moje założenia są słuszne) prawie trzy lub cztery razy większe od ciepła wody wrzącej"[2]).

Wyniki te Newton otrzymał, posługując się termometrem, którego opis zawiera przytoczona przez Celsiusa rozprawa.

„Przy użyciu termometru z olejem lnianym znalazłem, że ten sam olej, który wtedy, gdy termometr był zanurzony w topniejący śnieg, zajmował przestrzeń (spatium) 10000 części, rozrzedzony ciepłem ciała ludzkiego, zajmował przestrzeń 10256, ciepłem wody ledwo zaczynającej wrzeć przestrzeń 10705, ciepłem wody gwałtownie wrzącej 10725, ciepłem zaś ciekłej cyny, zaczynającej krzepnąć, 11516 i t. d."[3]).

Był to więc termometr o jednym punkcie stałym — temperaturze topniejącego lodu, taki, jakiego wcześniej używał Boyle. Do tego typu termometru nawrócił Réaumur w rozprawie, z której parę wyjątków przytoczyliśmy już wyżej.

RÉAUMUR (René Antoine Ferchault seigneur de Réaumur, des Angles et de la Bermandière) urodził się w roku 1683 we Francji. Początkowo studjował prawo, później zaś poświęcił się technice. Umarł w roku 1757.

[1]) Phil. nat. prin. math. liber III, prop. VIII — wydania Glasgowskiego tom 3-ci, str. 39. Wyraz „calor" służy Newtonowi do oznaczania pojęć, które obecnie rozdzielamy, — ciepła i temperatury.

[2]) Ibidem str. 175.

[3]) Ibidem str. 39.

Prawidła budowy termometrów ze skalami, dającemi się porównywać, które dają pojęcie o zimnie i cieple oraz mogą być sprowadzone do znanych miar.

(Hist. et Mém. de l'Académie de Paris 1730).

„...Używam silnie rozszerzających się cieczy, mianowicie wyskoku; ponieważ jednak istnieje niezliczona ilość jego gatunków, wybieram taki, który można mieć o każdej porze i w każdym kraju. Ustalam własności tego wyskoku tak, że jest rzeczą niemożliwą nieodróżnić go od innych. Doprowadzam wybrany wyskok do oznaczonej objętości w granicach jego rozszerzalności. To mogłoby być uskutecznione (przy zachowaniu pewnych środków ostrożności, o których później będzie mowa) z pomocą temperatury wrzenia wody, ja wszakże wołałem sztuczne zamrożenie wody, to znaczy, wody, którą się sztucznie stęża; p. Amontons zrobił to samo. Stopień rozszerzenia lub skurczenia, który przybiera wyskok dzięki temu lodowi, może być uważany za punkt stały i nadaje się do odtworzenia we wszystkich prawie krajach świata, gdzie są używane termometry.

Gdy wyskok jest dobrze określony i doprowadzony do takiej objętości, która odpowiada stałemu punktowi temperatury, to pozostaje jeszcze takie skalibrowanie wszystkich innych termometrów,... aby te same stopnie na rozmaitych termometrach zawsze wskazywały tę samą miarę temperatury, i aby ta miara odpowiadała pewnemu wyobrażeniu, podczas gdy zwykłym stopniom termometru nie odpowiada żadne wyobrażenie... Jak mi się zdaje, mielibyśmy wszystko, czego sobie tylko można życzyć, gdyby każdy stopień dawał dokładne wyobrażenie stopnia rozszerzania lub kurczenia się cieczy, gdyż działaniem ogrzania jest zwiększenie objętości. Czyż można lepiej mierzyć następujące po sobie stopnie ciepła, niż zapomocą stopni rozszerzania się cieczy; to zjawisko daje rzeczywisty obraz stopni ciepła... W naszym np. przypadku, gdzieśmy mieli 500 części, każdy stopień będzie wynosił $^1/_{500}$, i na takie części, na takie stopnie będzie podzielona cała rura... Gdy ciecz podniesie się o 1, 2, 3 lub, jeśli kto woli, o 20 stopni ponad znaczek, będzie to wskazywało, że objętość, która była początkowo 500, teraz jest 501, 502, 503 lub, jeśli kto woli, 520... Gdy przeciwnie, zimno wywoływało opuszczenie się o 10 stopni pod oznaczony punkt, to wiem, że zimno zgęszcza ciecz, i objętość zmniejszyła się o $^1/_{50}$.

— — — — — — — — — — — — — —

Wszystko, co fizycznie ma być zmierzone, może być oznaczone jedynie z przybliżoną dokładnością, która nam jednak wystarcza. Jedna okoliczność towarzyszy naszemu sprawdzaniu wyskoku, wpływając szkodliwie na pożądaną ścisłość. Ciecz, czy to zgęszczona w lodzie, czy też rozszerzona we wrzącej wodzie, powinnaby też znajdować się ciągle w naczyniach równej pojemności; ale z jakiegokolwiek materjału byłoby zrobione naczynie, podlega ono samo zgęszczeniu i rozszerzeniu. Jeżeli zimno lodu działa na kolbę, to kurczy się ona i zmniejsza swoją pojemność; gdy znów ciepło wrzącej wody powiększa pojemność, rozszerza kolbę. Kolba, która przy umiarkowanem cieple zawiera 1000, nie zawiera ich już tyle w zamarzniętej wodzie i zawiera więcej, gdy jest ogrzana do ciepła wrzenia. Mierzymy zawartość kolby w powietrzu o zwykłej temperaturze; znaczek przeto, który nazywamy 1000, nie odpowiada tej objętości, gdy kolba jest ochłodzona w wodzie; i miejsce na kolbie, które we wrzącej wodzie jest oznaczone przez 1075 lub 1080, posiada pojemność, przewyższającą tę liczbę. Nie można uniknąć tych odchyleń w obydwu kierunkach; ale sądzę, że można ich wielkość łatwo ocenić i wtedy poczynić poprawki w wynikach badań lub przynajmniej ocenić, czy opłaci się je uwzględnić.

— — — — — — — — — — — — — —

Ażeby otrzymać termometry, któreby posiadały stopnie, mogące być dokładnie i wygodnie porównywane we wszystkich krajach, musieliby się uczeni porozumieć co do jakości wyskoku: powinniby postawić żądanie, aby wszystkie termometry były napełnione tym wyskokiem, który został uznany za odpowiedni... Jakikolwiek wyskok... wybierzemy, zawsze należy oznaczać jego rozszerzalność na płytce termometru. Można np. u góry napisać: wyskok, którego objętość przy zamarzaniu wody wynosi 1000, a rozszerzona przez wodę wrzącą 1080. W tym przypadku, jeżeli termometr jest dostatecznie długi, znaczek rozszerzenia w punkcie wrzenia wody będzie oznaczony z prawej strony przez 80, z lewej — przez 1080. Gdy termometr nie jest tak długi, odrazu się poznaje brakujące stopnie".

Termometr Réaumura był, niewątpliwie, krokiem wstecz w porównaniu z termometrem Fahrenheita. Oparcie wyznaczania temperatury na pomiarze przyrostu objętości cieczy i to, jak można z tekstu sądzić, przyrostu rzeczywistego, a więc na pomiarze, z którym fizyka przez długie jeszcze lata nie mogła się uporać, wprowa-

dzało nowe i zupełnie niepotrzebne trudności. (Kto wie jednak, czy pomysł ten nie wypływał z rozpowszechnionego podówczas mniemania, że „ciepło" jest proporcjonalne do objętości ciała. Termometr Réaumura dawałby więc możność bardziej naukowego wyznaczania temperatury i z tego choćby względu ciekawa ta próba zasługuje na zaznaczenie).

Równie nieszczęśliwym pomysłem było użycie alkoholu, jako cieczy termometrycznej. Rtęć, której użył po raz pierwszy Halley (1693 r.) do napełniania termometru, pod wielu względami była dogodniejsza, szczególniej, gdy cechowanie termometru miało być doprowadzone do temperatury wrzenia wody, wyższej, jak wiadomo, w warunkach normalnych od temperatury wrzenia alkoholu. To też wkrótce termometr Réaumura wyszedł prawie całkowicie z użycia, z całej zaś pracy Réaumura ostał się, prawie po dziś dzień, podział różnicy temperatury wrzącej wody i topniejącego śniegu na 80 równych części,—podział, do którego sam Réaumur żadnej wagi nie przywiązywał.

Próba Réaumura dania skali termometrycznej naukowego uzasadnienia nie była odosobniona. Poczucie bowiem, że skale takie, jak Fahrenheita i Celsiusa, są skalami wyłącznie empirycznemi, nie pozwalało uznać ich za ostateczny wynik badań fizycznych w tej dziedzinie. Starano się przeto związać je z obliczeniem całkowitej ilości ciepła, zawartego w danem ciele. Do obliczeń tych prowadziły dwie metody: jedna bezpośrednia — przez kalorymetryczne pomiary ciepła, zawartego w danem ciele, druga pośrednia — przez wyznaczenie takiego „stanu cieplnego" ciała, któryby odpowiadał „bezwzględnemu zimnu", a więc któryby mógł służyć za podstawę przy wyznaczaniu temperatur. Pierwsza z tych metod wkrótce już ugrzęzła w sprzecznościach bez wyjścia, druga doprowadziła do zbudowania termometru, o wiele dokładniejszego od termometru rtęciowego, i nawet, po wielu błąkaniach, osiągnęła upragniony cel — otrzymanie „zera bezwzględnego".

Prace nad termometrem gazowym. — Podstawą tej drugiej metody było następujące rozumowanie. Wyobraźmy sobie jakąś własność ciała, którą możemy zmierzyć i wyrazić odpowiednią liczbą; wartość liczbowa tej własności, wyznaczana przy różnych stopniach ogrzania ciała, ulega większej lub mniejszej zmianie. Wymierzmy tę zmianę przy podnoszeniu temperatury o 1^0, przyczem skala użyta może być dowolna; jeżeli podnoszeniu się temperatury odpowiada ciągle jeden i ten sam kierunek zmiany, to, oczy-

wiście, zmniejszaniu się odpowiadać będzie kierunek przeciwny. Możemy zawsze wziąć za podstawę skali termometrycznej taką własność ciała, której wartość liczbowa rośnie wraz z temperaturą, a więc zmniejsza się przy oziębianiu. Możemy założyć, że przy odpowiednio silnem oziębieniu wartość dana staje się zerem. Wtedy dany „stan cieplny" odpowiada „największemu zimnu".

Na tego rodzaju wniosku, niczem właściwie nieuzasadnionym i, co więcej, przy użyciu dwu różnych własności jednego i tego samego ciała lub nawet tej samej własności dwu różnych ciał, prowadzącym do zgoła sprzecznych wyników, oparł się fizyk francuski Amontons w swych rozważaniach nad barometrem powietrznym. (Amontons Wilhelm, ur. 1663 r., um. 1705 r.).

Amontons założył, że „siła rozprężająca" powietrza jest właśnie miarą „stanu cieplnego" i że największemu zimnu odpowiada „siła rozprężająca" równa zeru. Użycie przez Amontonsa powietrza, jako ciała termometrycznego, uwarunkowane głównie jego wielką rozszerzalnością, było szczęśliwym przypadkiem w historji rozwoju termometrji. To samo bowiem w gruncie rzeczy rozumowanie Réaumura, zastosowane do objętości alkoholu, nie dało, jak powyżej była mowa, nic poza bezpłodnym wysiłkiem.

Prosty w budowie termometr Amontonsa składa się z kuli szklanej, z dołączonym do niej manometrem rtęciowym. Masa powietrza w kuli tak była dobrana, że w temperaturze wrzącej wody prężność wynosiła 73 cale rtęci, a więc przeszło dwie atmosfery. Amontons stwierdził, że przy zanurzeniu kuli do zimnej wody prężność ta zmniejszała się o jedną trzecią.

Założenia Amontonsa pozwalały na wycechowanie termometru przy użyciu jednego tylko punktu stałego. Liczba, wyrażająca „stopień ciepła", była poprostu proporcjonalna do prężności powietrza, którego prężność w danej stałej temperaturze musiała być równa oznaczonej, założonej zgóry wartości. Urzeczywistnienie jednak takiej skali wymagało opracowania dokładnej metody wyznaczania przyrostu prężności, zbadania, jaki wpływ mogą wywrzeć przypadkowe zanieczyszczenia lub domieszki gazów innych, jaką rolę odgrywa początkowa (t. zn. odpowiadająca temperaturze wrzenia wody) prężność gazu, jednem słowem, zbadania fizycznych własności gazów.

Badania te były połączone z wielu trudnościami doświadczalnemi, to też wykonanie w całości tego planu wymagało pracy niejednego pokolenia fizyków.

W sześć lat po Amontonsie de la Hire zwrócił uwagę na

rolę, jaką przy pomiarach odgrywa wilgotność powietrza. Ale nawet przy uwzględnieniu tego źródła błędu nie mógł on uzgodnić wyników pomiarów, jakie sam wykonał; to go skłoniło do zaniechania dalszych prób w tym kierunku i do wyprowadzenia wniosku o niemożliwości dokładnego zbadania własności cieplnych powietrza, dopóki nie będzie lepiej poznana natura tego gazu. Pozornem potwierdzeniem tego wniosku była daleko posunięta rozbieżność wartości spółczynnika rozszerzalności powietrza, otrzymywanych przez różnych fizyków; tak np. pierwszorzędni uczeni owego czasu Monge, Berthollet i Vandermonde znaleźli, że przy podniesieniu temperatury o 1°R. powietrze rozszerza się o $\frac{1}{184,83}$, co w skali Celsiusa odpowiadało spółczynnikowi rozszerzalności równemu mniej więcej 0,00433; dla tej samej wielkości Roy znalazł liczbę 0,00488. Błędy te jednak nie pozostały bez korzyści dla nauki, wyjaśniały one bowiem coraz bardziej całe zagadnienie i umożliwiły wreszcie dokładniejsze jego rozwiązanie. Pierwszym, który znalazł dla spółczynnika rozszerzalności powietrza liczbę mało się różniącą od przyjętej obecnie, był, jak się zdaje, Charles.

CHARLES (Jacques Alexandre), ur. w 1746 r., um. w 1825 r. Fizyką zaczął się zajmować, będąc już człowiekiem starszym, pod wpływem doświadczeń i odkryć Franklina (p. Elektryczność). Nazwisko jego jest związane z historją aeronautyki, gdyż on pierwszy użył wodoru do napełniania balonu.

Charles jednak nigdzie nie ogłosił wyników swych badań. O pracach jego w tej dziedzinie wiemy ze wzmianki w przytoczonej niżej rozprawie Gay-Lussaca, który metodę jego ulepszył i zastosował ją do większej ilości gazów i par, kładąc tym sposobem podwalinę ścisłej termometrji i fizyki gazów.

GAY - LUSSAC (Louis Joseph) urodził się w 1778 roku. Po ukończeniu szkoły politechnicznej poświęcił się karjerze naukowej. W 1808 roku został profesorem fizyki w Sorbonie, w następnym zaś roku objął tamże katedrę chemji. Działalność jego naukowa obejmowała w jednakim stopniu zjawiska chemiczne, jak i fizyczne. W obydwu też tych dziedzinach prace jego posiadają duże znaczenie. Z prac fizycznych najważniejszą, poza podaną niżej pracą o rozszerzalnością gazów, jest praca o zmianach temperatury gazów, wywołanych przez zmianę gęstości. Praca ta nie została należycie przez współcze-

snych oceniona i zrozumiana. Z drobniejszych badań należy wymienić: badania zmian wilgotności, temperatury i chemicznego składu powietrza (badania te przeprowadzał, wznosząc się balonem), badania wpływu ścian naczynia na wrzenie i t. d.

Umarł w roku 1850.

Badania rozszerzania się gazów i par pod wpływem ciepła[1].

(Annales de Chimie, t. 43, rok X).

ROZDZIAŁ I

Przedmiot tej rozprawy.

„...Wiele jeszcze brak, abyśmy mogli polegać na naszej znajomości rozszerzalności gazów i pary oraz biegu termometru. a jednak prawie codziennie zdarza się nam sprowadzać objętości gazu od temperatury danej do innej temperatury; mierzyć ciepło, uwolnione lub pochłonięte przy zmianie stanu skupienia lub temperatury ciała; obliczać wydajność maszyn parowych i rozszerzanie się rozmaitych materyj pod wpływem ciepła; oceniać ilość wody rozpuszczonej w powietrzu, zależną od temperatury i gęstości powietrza w sposób jeszcze nieznany; i poznawać najdokładniej gwoli refrakcji astronomicznej lub pomiarów wysokości zapomocą barometru temperaturę powietrza i prawa jego rozszerzalności...

Badania rozszerzalności gazów i par pod wpływem ciepła, jak również badania biegu termometru, które przedsięwziąłem, nie są jeszcze ukończone. W niniejszej pracy będę tedy mówił tylko o rozszerzalności gazów i par przy jednakowem danem podwyższeniu temperatury i będę się starał wykazać, że rozszerzalność ta jest dla tych wszystkich płynów zupełnie jednakowa.

— — — — — — — — — — — — — —

ROZDZIAŁ II.

Rys historyczny dawniejszych badań nad rozszerzalnością gazów.

To, że powietrze atmosferyczne rozszerza się przy ogrzewaniu, było, coprawda, znane na długo przed Amontonsem; zdaje się jednak, że był on pierwszym, który starał się zmierzyć wielkość tego

[1]) „Recherches sur la dilatation des gaz et des vapeurs par le citoyen Gay-Lussac, Elève-ingénieur de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées", rok 1802. Tłumaczono z przekładu niemieckiego w „Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften" Nr. 44, str. 3 i nast.

rozszerzenia dla danego podwyższenia temperatury. W tym celu zamknął on zapomocą rtęci powietrze w kuli, przylutowanej na końcu odwróconego lewara, i zanurzył ten przyrząd w ciepłej kąpieli wodnej. Powietrze, rozszerzone pod wpływem gorąca, cisnęło na rtęć i podnosiło ją w drugiem ramieniu lewara tak, że mógł on sądzić z wysokości rtęci ponad jej położeniem w kuli o prężności powietrza. Z wielu takich doświadczeń nad przestrzeniami powietrznemi rozmaitej wielkości (Mém. de l'Acad. 1699. 1702.) wnioskuje on: 1) że ciepło gotującej się wody nigdy nie przekracza pewnej granicy; 2) że niejednakowe przestrzenie powietrzne przy równym stopniu nagrzania w równej mierze powiększają swą sprężystość i odwrotnie. Następnie wykazuje, że gorąco gotującej się wody podnosi sprężystość powietrza, choćby zgęszczonego, zawsze mniej więcej o jedną trzecią, że np. powietrze, zgęszczone przez 60 cali rtęci włącznie z ciśnieniem atmosferycznem, może podnieść w temperaturze gotującej się wody słup rtęci mniej więcej 80 cali. Stąd wnioskuje on, że „jeden, choćby najmniejszy, stopień ciepła jest w stanie powiększyć siłę sprężystości powietrza tem bardziej, im większy ciężar je zgęszcza".

Gdyby A m o n t o n s brał za punkt wyjścia przy swoich badaniach jakiś dokładniej oznaczony stopień ciepła, niż ten, który on nazywa umiarkowanym (co jednak wówczas nie łatwo było wykonać), to możnaby z jego doświadczeń obliczyć z dużem przybliżeniem rozszerzalność powietrza atmosferycznego. Ponieważ jednak wykonał on swe doświadczenia porównawczo z przestrzeniami powietrznemi rozmaitej gęstości, można z doświadczeń tych co najmniej wywnioskować to, *że dana objętość powietrza pod wpływem równych stopni ciepła stale osiąga przyrost sprężystości, pozostający przy wszystkich stopniach gęstości powietrza w tym samym stosunku do jego sprężystości początkowej.*

— — — — — — — — — — — — — —

Zanim pójdę dalej, muszę zaznaczyć, że to, co znalazłem z wielu doświadczeń, a mianowicie, że tlen, azot, wodór, kwas węglowy i powietrze atmosferyczne rozszerzają się od 0° do 80° proporcjonalnie o tę samą wielkość, już przed 15 laty spostrzegł obywatel C h a r l e s. Ponieważ jednak nie ogłosił on wyników swoich doświadczeń, był to więc prosty przypadek, że się z niemi zapoznałem...

(Pomiary C h a r l e s'a wydawały się jednak G a y - L u s s a c owi nie ścisłe).

— — — — — — — — — — — — — —

ROZDZIAŁ IV.

Badania i wyniki.

Sześć doświadczeń z powietrzem atmosferycznem... dało mi następujące wyniki: powietrze atmosferyczne, które w temperaturze topniejącego śniegu zajmowało objętość 100 części [1]), ogrzane do ciepła gotującej się wody, rozszerzało się do objętości

137,4 137,6 137,54 137,55 137, 48 137,58

takich części, co daje przeciętne rozszerzenie mniej więcej 137,5 części [2]).

Jeżeli podzielimy całe to rozszerzenie przez liczbę stopni, które je wywołały, czyli przez 80, znajdziemy, jeżeli przyjmiemy objętość w 0^0 za jedność, że powiększenie objętości wynosi $\frac{1}{213,33}$ na każdy stopień lub $\frac{1}{266,66}$ na każdy stopień skali stustopniowej.

— — — — — — — — — — — — — —

Jeżeli więc ogrzejemy do gorąca wrzenia wody ilość gazu, która w temperaturze topniejącego śniegu zajmuje objętość 100 części, to wtedy rozszerzy się:

100 części	o	różnica
powietrza atmosferycznego . .	37,5 części	—
wodoru	37,52 „	+0,02
tlenu	37,49 „	—0,01
azotu	37,49 „	—0,01

Ponieważ różnice, otrzymane w wyżej przytoczonych wynikach, dochodzą tylko do dwu dziesięciotysiącznych początkowej objętości gazu, należy je niewątpliwie przypisać czysto przypadkowym okolicznościom, i z doświadczeń tych można z całą pewnością wyprowadzić twierdzenie, że równe objętości tych czterech

[1]) Balon mój zawierał około 350 gramów wody.

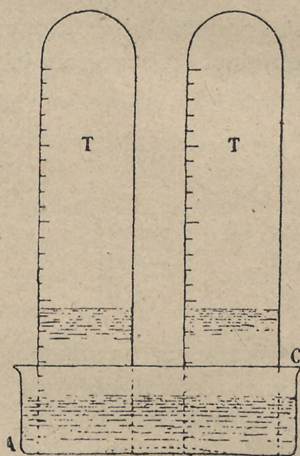
[2]) Chociaż różnice w wynikach są nadzwyczaj małe, to jednak sądzę, że mógłbym był jeszcze je zmniejszyć, gdybym uwzględnił w rachunkach stan barometru podczas gotowania. Coprawda, nigdy nie zapominałem podczas gotowania obserwować termometru w gotującej się wodzie, nigdy jednak nie zauważyłem znacznych różnic. Istotnie, trzebaby było zmiany barometru o cały jeden cal, aby wywołać zmianę punktu wrzenia wody o 1^0. W każdym razie przeciętna 137,5 musi być bardzo bliska prawdy.

gazów rozszerzają się przy podniesieniu temperatury od punktu zamarzania do punktu wrzenia dokładnie o tę samą wielkość.

— — — — — — — — — — — — — —

Wyżej opisane doświadczenia, wykonane wszystkie z wielką starannością, dowodzą niezbicie, że powietrze atmosferyczne, tlen, wodór, azot, gaz saletrzany, gaz amonjakalny, chlorowodór, bezwodnik siarkowy i bezwodnik węglowy pod wpływem równych stopni ciepła wszystkie naogół rozszerzają się w stosunkach jednakowych, i że wobec tego różnice w gęstości tych gazów w jednakowych warunkach ciśnienia i temperatury, różna ich rozpuszczalność w wodzie, a głównie odrębna ich natura nie mają żadnego wpływu na rozszerzalność pod wpływem ciepła.

Stąd wnioskuję dalej, że wszystkie naogół rodzaje gazów rozszerzają się w stosunkach jednakowych pod wpływem równych stopni ciepła i w jednakowych pozostałych warunkach.



Rys. 51.

Badania te nad rozszerzalnością gazów doprowadziły mnie w sposób zrozumiały do badań nad rozszerzalnością par pod wpływem ciepła. Z góry już było prawdopodobne, że pary również będą się rozszerzały tak samo, jak gazy, chodziło przeto tylko o zbadanie jednego rodzaju pary. Wybrałem w tym celu parę eteru, przygotowanego zapomocą kwasu siarkowego, gdyż z nim najłatwiej się obchodzić. Dla oznaczenia rozszerzalności pary eteru posługiwałem się przyrządem z dwiema rurami. Po zanurzeniu na pewien czas tego przyrządu w kąpieli powietrznej o temperaturze mniej więcej 60° R. wpuściłem do jednej z dwu rur trochę pary eteru, a do drugiej tyleż powietrza atmosferycznego tak, że obiedwie objętości odpowiadały tej samej podziałce, następnie zaś podniosłem temperaturę kąpieli powietrznej od 60° do 100°. Z prawdziwą radością stwierdziłem, że zarówno przy rozszerzaniu, jak następnie przy kurczeniu się podczas ochładzania para eteru zawsze dotrzymywała kroku powietrzu atmosferycznemu i jednocześnie z niem zawsze dochodziła do jednakowej podziałki skali; doświadczenie to, przy którem był obecny Berthol-

let[1]), było powtórzone wiele razy, i nigdy nie mogłem zauważyć najmniejszej różnicy w rozszerzalności pary i powietrza atmosferycznego; chyba tylko, że para eteru, gdy jej temperatura spadła do niewielu stopni ponad punktem wrzenia eteru, zgęszczała się nieco prędzej, niż powietrze atmosferyczne. To jednak zależy od zjawiska, któreśmy spostrzegali również przy wielu ciałach ciekłych, gdy przechodziły w stan stały, a już o parę stopni ponad temperaturą, przy której odbywa się to przejście, niema ono żadnego wpływu. Ponieważ doświadczenie to wskazuje, że para eteru i gazy rozszerzają się zupełnie jednakowo pod wpływem ciepła, jest więc ono dla nas dowodem, że ta ich rozszerzalność nie zależy od szczególnej natury gazów i par, lecz jedynie od tego, że znajdują się one w stanie płynu sprężystego. Możemy więc stąd wywnioskować, że wszystkie gazy i pary rozszerzają się pod wpływem równych stopni ciepła w stosunkach jednakowych.

Ponieważ wszystkie gazy rozszerzają się jednakowo pod wpływem ciepła, jak również jednakowo się zgęszczają, i ponieważ te obiedwie własności są z konieczności związane ze sobą, musimy przeto wnioskować, że pary z chwilą, gdy mają jednakową z gazami rozszerzalność, muszą też być jednakowo ściśliwe. Wniosek ten jednak o tyle tylko jest słuszny, o ile zgęszczone pary pozostają w stanie płynu zupełnie sprężystego; a to wymaga wysokiej temperatury, koniecznej dla nadania im dostatecznego oporu przeciwko ciśnieniu, które stara się je sprowadzić do stanu ciekłego. Wyżej już przytaczałem za Saussure'm[2]) (a moje badania w zupełności to potwierdzają), że wszelkie suche powietrze i powietrze, zawierające mniej lub więcej rozpuszczonej wody, jednakowo się rozszerzają. Jesteśmy więc uprawnieni do wyprowadzenia ze wszystkiego, co wyżej przytoczyliśmy, następujących wniosków:

1) Wszystkie gazy, jakąkolwiek byłaby ich gęstość, ilekolwiek zawierałyby wilgoci, a również wszystkie pary, rozszerzają się o równe wielkości pod wpływem równych stopni ciepła.

---

[1]) Berthollet (Claude Louis hr. de B.) ur. w 1748 r., um. w 1822 r., jeden z najznakomitszych chemików 18 wieku. Badania jego nad kwasem pruskim i cjankami pozwoliły Gay-Lussacowi, który był jego uczniem, odkryć cjan. Poglądy swoje na istotę zjawisk chemicznych wyraził Berthollet w znakomitem dziele „Essai de statique chimique" (1803 r.).

[2]) Saussure (Horace Bénédicte de S.) ur. w 1740 r. w Couches pod Genewą, um. 1799 r. Był wybitnym geologiem, zajmował się jednak pozatem i fizyką. Zbudował hygroskop, który opisał w rozprawie „Essais sur l'hygrométrie (1783 r.).

2) Gazy trwałe po ogrzaniu od temperatury punktu zamarzania do temperatury punktu wrzenia powiększają swoją objętość o $\frac{80}{213,33}$ swej objętości początkowej dla termometru, podzielonego na 80 części, lub o $\frac{100}{266,66}$ dla — podzielonego na 100 części".

Wartość spółczynnika rozszerzalności powietrza, znaleziona przez Gay-Lussaca, została dziwnym zbiegiem okoliczności w tym samym prawie czasie otrzymana przez Daltona, a następnie przez tak wytrawnych eksperymentatorów, jak Dulong i Petit. Dopiero Rudberg, napotkawszy w 1837 roku sprzeczność w swych wywodach przy użyciu danych Gay-Lussaca, poddał na nowo badaniu to zagadnienie i częściowo poprawił liczbę Gay-Lussaca. Po nim pomiary spółczynnika rozszerzalności powietrza wykonywał cały szereg uczonych; z prac, przez nich wykonanych, na szczególną uwagę zasługują prace Magnusa i Regnaulta. Jest rzeczą bardzo pouczającą, pisze Wilhelm Ostwald w uwagach do niemieckiego tłumaczenia pracy Gay-Lussaca, przyjrzeć się rozwojowi tego zagadnienia i widzieć, jak pomiary, które obecnie na zajęciach praktycznych każdy student wykonywa z dokładnością do 1°/₀, wymagały całego natężenia sił i zdolności najtęższych głów naukowych.

Dalsze postępy termometrji. — Wzrastająca dokładność pomiarów obaliła wniosek Gay-Lussaca o jednakowej rozszerzalności wszystkich gazów. Pomiary Regnaulta dawały na współczynnik rozszerzalności gazów wartości następujące: powietrza... 0,0036653; wodoru... 0,0036678; azotu... 0,0036682. Dla tlenu Jolly znalazł... 0,0036748. Późniejsze pomiary (Kammerlingh Onnes, Chappuis, Travers i Jacquerod) dały dla wodoru liczby, wahające się pomiędzy 0,00366254 (Chappuis) a 0,0036627 (Travers i Jacquerod).

Co więcej, stwierdzenie przez Despretza, Regnaulta i następnie Amagata, że prawo Boyle'a-Mariotte'a jest prawem przybliżonem, obowiązującem w wysokich temperaturach i w niewielkim stosunkowo zakresie ciśnień, postawiło na porządku dziennym pomiar spółczynnika rozprężliwości gazów, który Amontons i późniejsi badacze, nie wyłączając Gay-Lussaca, przyjmowali za równy spółczynnikowi rozszerzalności.

To powiększanie się pola badań nie umniejszyło znaczenia termometru gazowego. Pozostał on, jak i poprzednio, przyrządem o wiele

bardziej nadającym się do ścisłych pomiarów, niż termometr rtęciowy. Cechowanie jego jednak musiało ulec daleko idącej zmianie. Przedewszystkiem rodzaj użytego gazu przestał być już obojętnym; dwa identyczne co do rozmiarów i co do początkowych prężności termometry, napełnione dwoma różnemi gazami, dawały niejednakowe wskazania, przyrosty bowiem prężności wypełniających je gazów były w tych samych granicach zmian temperatury różne. Stąd konieczność wyboru jednego, ściśle oznaczonego gazu oraz, wobec zależności spółczynnika rozprężliwości od ciśnienia, konieczność dokładnego ustalenia jego prężności początkowej. Nie mógł się również utrzymać pomysł Amontonsa uważania zmian prężności za „bezwzględną" miarę „stanu cieplnego". Miar tych bowiem było tyle, ile rodzajów gazów i ile prężności początkowych. Taką miarą mogłyby być tylko zmiany wielkości, całkowicie niezależnej od rodzaju ciała termometrycznego. Znalezienie takiej miary umożliwiła dopiero t. zw. druga zasada termodynamiki. Okazało się wtedy, że ta „skala bezwzględna" tem mniej różni się od skali Amontonsa, im mniej gaz, użyty w termometrze, różni się swemi własnościami od t. zw. gazu doskonałego. Temu warunkowi w szerokim zakresie temperatur odpowiada wodór (a jeszcze bardziej hel). To też do roku 1911 za termometr „normalny" uważano termometr wodorowy, odpowiadający pewnym wymaganiom, ustalonym przez międzynarodową komisję miar i wag w 1887 r. Ostatnio jednak za normę użyto skalę gazu doskonałego, termometr zaś wodorowy stał się termometrem pomocniczym, do którego wskazań wprowadza się odpowiednie poprawki, łatwe stosunkowo do obliczania ze znanych dokładnie odstępstw wodoru od prawa Boyle'a-Mariotte'a i Gay-Lussaca. Być może, że termometr gazowy zostanie całkowicie wyparty przez oporowy termometr platynowy, w którym zmianie temperatury odpowiada zmiana oporu drutu platynowego. Będzie to jakby zakończenie ewolucji, której podlegała termometrja w ciągu ostatnich kilku dziesiątków lat. W dziedzinach bowiem bardzo niskich i bardzo wysokich temperatur użycie termometrów, opartych na zmianie objętości lub prężności ciała termometrycznego, często okazywało się niemożliwe. Trzeba było uciec się do innych zupełnie metod, opartych na innych zasadach: na zmianie siły elektrobodźczej ogniwa termoelektrycznego, na zmianie natężenia i składu promieniowania, wysyłanego w danej temperaturze. Rozpatrzenie tych metod przekracza granice naszego działu.

Rozdział II.

SKRAPLANIE GAZÓW.

STWIERDZENIE przez Gay-Lussaca, że pary posiadają ten sam współczynnik rozszerzalności, co i gazy, dawało poważne uzasadnienie powszechnie wówczas obowiązującemu poglądowi, że gazy i pary stanowią, właściwie, jeden i ten sam stan skupienia, i że każdy gaz mógłby w odpowiednich warunkach przejść, podobnie jak para, w stan ciekły.

Na długo przed ukazaniem się pracy Gay-Lussaca pisał Lavoisier:

„Gdyby ziemia znalazła się nagle w okolicach bardzo zimnych, naprzykład, w sąsiedztwie Jowisza lub Saturna,... powietrze lub przynajmniej część składających je substancyj lotnych przestałaby, bezwątpienia, istnieć w stanie niewidzialnego płynu z braku dostatecznego stopnia ciepła: wróciłyby one do stanu ciekłego, ta zaś zmiana wytworzyłaby nowe ciecze, o których nie mamy żadnego wyobrażenia".

Na potwierdzenie tego poglądu fizyka ówczesna mogła przytoczyć niewiele stosunkowo faktów doświadczalnych. Prawda, że już w 1790 r. Van Marum, sprawdzając dla amoniaku prawo Boyle'a-Mariotte'a, stwierdził ku swemu zdumieniu skraplanie się tego gazu, i że w kilka lat później Monge i Clouet otrzymali przez stosowne obniżenie temperatury ciekły SO_2 pod ciśnieniem atmosferycznem. Fakty te jednak były zbyt odosobnione, aby można było na nich budować teorje, tem większego przeto znaczenia nabierały badania Gay-Lussaca.

Dopiero ogłoszona w 1823 r. rozprawa Faradaya (p. Elektryczność) dostarczyła nowych dowodów na poparcie twierdzenia tożsamości gazów i par. Faradayowi udało się skroplić chlor, siarkowodór, chlorowodór, amoniak, bezwodnik węglowy i t. p. Me-

toda, jakiej używał, polegała głównie na zwiększaniu ciśnienia i na niewielkiem stosunkowo chłodzeniu gazów.

Samo jednak powiększenie ciśnienia okazało się dla większości gazów niewystarczającem, to też w drugiej pracy, ogłoszonej w 1845 roku, Faraday stosuje już metodę nieco odmienną: gaz, silnie ściśnięty (do 40 atmosfer), oziębiał zapomocą mieszaniny stałego CO_2 i eteru, parujących pod zmniejszonem ciśnieniem, otrzymując w ten sposób około 110° C poniżej zera. Ten sposób postępowania dał wyniki znacznie lepsze: Faradayowi udało się skroplić wszystkie prawie podówczas znane gazy, z wyjątkiem sześciu: wodoru, tlenu, azotu, gazu błotnego (CH_4), tlenku azotu (NO) i tlenku węgla (CO), które, mimo tak znacznego obniżenia temperatury i powiększenia ciśnienia do 50 atm., nie zmieniły swego stanu skupienia.

Te niepowodzenia skłoniły fizyków do utworzenia z tych gazów odrębnej grupy gazów trwałych o innych od pozostałych gazów i par własnościach. Racjonalność takiej klasyfikacji zdawały się potwierdzać doświadczenia Berthelota (1850) i Natterera (1854), w których gazy były poddawane olbrzymim ciśnieniom (780 atm. w doświadczeniach Berthelota, około 2800 atm. w doświadczeniach Natterera). Przyczyna niepowodzeń leżała jednak gdzieindziej. Jeszcze w 1822 Cagniard de la Tour zauważył, że przy ogrzewaniu cieczy w naczyniach zamkniętych ciecze te w pewnej temperaturze nagle zamieniały się w pary, nie o wiele zmieniając swą objętość, a więc, znajdując się pod bardzo wysokiem ciśnieniem. Istotne znaczenie tego doświadczenia zostało należycie ocenione przez Faradaya:

„Jest rzeczą prawdopodobną, pisze Faraday, że w tej temperaturze żadne zwiększone ciśnienie, chyba nadzwyczaj wielkie, nie może skroplić utworzonego gazu. Otóż, temperatura —110° leży dla wodoru, tlenu i azotu ponad tym stopniem, nie należy przeto oczekiwać, aby pod jakiemkolwiek ciśnieniem — chyba pod takiem, któremuby towarzyszyło zimno o wiele jeszcze większe, niż to, które można było wytworzyć — można je było zmusić do zmiany swego stanu gazowego"[1]).

Do podobnego wniosku prowadziły również badania własności cieczy w zależności od temperatury. Drion dla ciekłego bezwodnika siarkowego, i Thilorier dla ciekłego bezwodnika węglowego zna-

[1]) Cytata w tekście wzięta z książki Georges Claude'a „Air liquide, oxygène, azote". Paryż 1909, str. 47.

leźli, że spółczynnik rozszerzalności cieplnej tych cieczy wzrasta bardzo prędko ze wzrostem temperatury, dorównywując lub nawet przewyższając pod tym względem spółczynnik rozszerzalności cieplnej gazów. Tak np. spółczynnik rozszerzalności cieplnej ciekłego bezwodnika siarkowego (SO_2) wynosi w temperaturze 0°... 0,001734, w temperaturze 130°... 0,009571 (spółczynnik rozszerzalności cieplnej gazów przeciętnie wynosi 0,0036).

To zacieranie się granicy między cieczami i gazami zostało uwydatnione jeszcze jaskrawiej przez pomiary ciepła utajonego parowania w rozmaitych temperaturach. Doświadczenia Regnaulta, a następnie Mendelejewa wykazały, że ciepło utajone parowania zmniejsza się naogół ze wzrostem temperatury; w temperaturze, odpowiadającej nagłemu znikaniu cieczy w doświadczeniach Cagniard de la Toura, którą Mendelejew nazwał bezwzględną temperaturą wrzenia, wielkość ciepła utajonego zbliża się do zera.

Te wszystkie rozproszone fakty, oddzielne obserwacje i niesharmonizowane wnioski zostały ujęte w jedną spójną całość przez fizyka angielskiego Andrewsa w niżej podanej pracy.

ANDREWS (Thomas) ur. się w 1813 r. w Belfaście, umarł tamże w 1885 r. Kształcił się w Glasgowie, pracował następnie w Paryżu, w laboratorjum Dumasa, stopień doktora medycyny otrzymał w 1835 roku w uniwersytecie edynburskim. W 1845 roku został profesorem chemji w Belfaście i katedrę tę zajmował do 1879 roku. W 1855 r. ogłosił pracę, w której dowiódł, że ozon jest tlenem allotropowym. Badania nad gazami zaczął prowadzić od 1860 roku. Podaną niżej pracę ogłosił w 1869 r., w 1876 r. ogłosił jej uzupełnienie.

O ciągłości stanów materji gazowego i ciekłego.

(Philosoph. Trans. of. Roy. Soc. of London. Vol. 159, 1869, str. 575—589 [1]).

„W roku 1822 Cagniard de la Tour spostrzegł, że pewne ciecze, jak eter, alkohol, woda są przy nagrzewaniu w szczelnie zamkniętych rurach pozornie zamieniane w parę w objętości dwa do czterech razy większej od jej objętości początkowej. Wykonał on

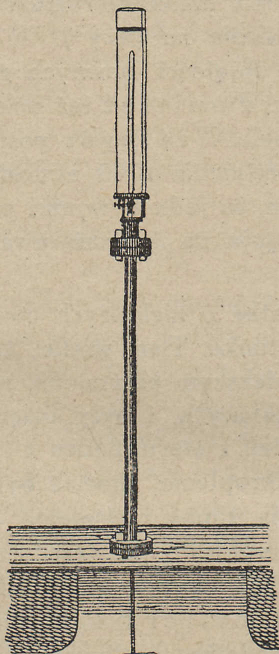
[1]) „On the Continuity of the Gaseous aud Liquid States of Matter". Tłumaczone z przekładu niemieckiego w „Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften" Nr. 132.

również kilka liczbowych wyznaczeń wywieranego wtedy ciśnienia [1]. W następnym roku udało się Faradayowi zapomocą samego tylko ciśnienia zamienić w ciecz chlor i różne inne ciała, znane podówczas jedynie w postaci gazowej [2]. W parę lat później Thilorier otrzymał stały bezwodnik węglowy i zauważył, że spółczynnik rozszerzalności cieplnej ciekłego bezwodnika węglowego jest większy, niż jakiegokolwiek innego ciała gazowego [3]. Druga rozprawa, ogłoszona przez Faradaya w 1845 roku, znacznie rozszerzyła nasze wiadomości o działaniu zimna i ciśnienia na gazy [4]. Regnault starannie badał bezwzględną zmianę objętości pewnych gazów, gdy są one poddane ciśnieniu 20 atmosfer; Pouillet też dokonał kilku doświadczeń w tym samym przedmiocie. Natterer posunął swoje doświadczenia aż do niesłychanego ciśnienia 2790 atmosfer, i chociaż metoda jego nie jest bez zarzutu, to jednak wyniki przez niego otrzymane, są bardzo cenne i zasługują na większą uwagę, niż to miało miejsce dotychczas [5].

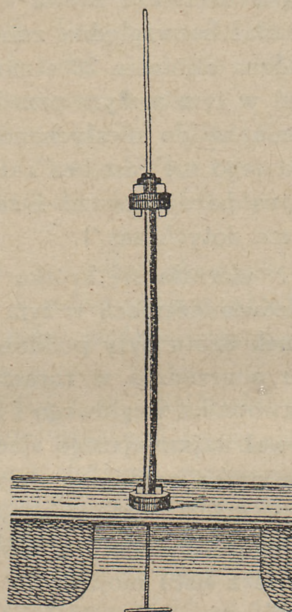
W 1861 r. ukazała się krótka notatka o niektórych moich wcześniejszych doświadczeniach w tym kierunku. Tlen, wodór, azot, tlenek węgla i tlenek azotu były poddane większym ciśnieniom, niż te, które osiągano poprzednio w rurach szklanych, i były oziębiane przy pomocy bezwodnika węglowego i kąpieli z eteru. Żaden z tych gazów nie wykazywał najmniejszego śladu skroplenia, chociaż były one doprowadzane przez zespolone działania zimna i ciśnienia do objętości mniejszej niż $^1/_{500}$ ich objętości zwykłej [6]. W trzeciem wydaniu „Millera chemji fizycznej" z roku 1863 ukazało się krótkie streszczenie, wzięte z listu mojego do Dra Millera, kilku nowych wyników, które otrzymałem dla bezwodnika węglowego w pewnych określonych warunkach ciśnienia i temperatury. Ponieważ wyniki te stanowią podstawę obecnego badania i nigdy nie były oddzielnie ogłoszone, pozwalam sobie przeto przytoczyć tutaj następujący wyjątek z mojego pierwotnego komunikatu przesłanego D-rowi Millerowi. „Przy częściowem skropleniu bezwodnika węglowego zapomocą samego tylko ciśnienia i przy równoczesnem stopniowem pod-

[1]) Annales de chimie. Serja II, Tom XXI, str. 127 i 178, również tom XXII, str. 140.
[2]) Philosoph. Transact. 1823, str. 160—189.
[3]) Annales de Chimie, Serja II, Tom LX, str. 427 i 432.
[4]) Philosoph. Transact. 1845, str. 155.
[5]) Pogg. Annalen. Tom XCIV, str. 436.
[6]) Report of the British Assoc. 1861. Transact. of Sections, str. 76.

noszeniu temperatury do 88° F. powierzchnia rozdziału między cieczą i gazem stawała się coraz słabszą, traciła swoją krzywiznę i w końcu całkowicie zniknęła. Przestrzeń była wtedy wypełniona jednorodną cieczą, która, gdy ciśnienie nagle się zmniejszało lub gdy temperatura nieco opadała, przybierała szczególny wygląd, który jej nadawały poruszające się i drgające w całej masie smugi. W temperaturach powyżej 88° F. nie można było otrzymać żadnego pozorne-



Rys. 52.



Rys. 53.

go skroplenia bezwodnika węglowego lub rozdzielenia na dwa różne stany skupienia nawet, gdy było użyte ciśnienie od 300 do 400 atmosfer. Kwas azotawy dał analogiczne wyniki" [1]).

Przyrząd, użyty do tych badań jest wyobrażony na rysunku. Rys. 52 i rys. 53 wyobrażają go w prostej postaci, przy której tylko jeden gaz jest poddany ciśnieniu... gaz, który ma być zgęszczony, wprowadzamy do rury *fa* (rys. 54), która od *a* do *b* jest włoskowata... starannie osuszany gaz jest przepędzany w ciągu wielu godzin przez rurę, otwartą na obydwu końcach... Prąd ten był przepuszczany tak dłu-

---

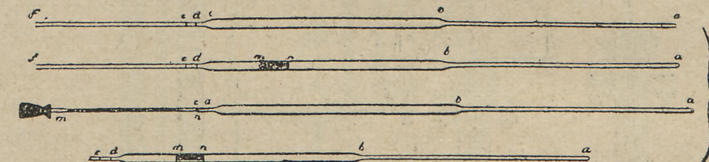
[1]) Miller's Chemical Physic. Wyd. III, str. 328.

go, dopóki pozostałość powietrza, po traktowaniu potasem żrącym, nie była doprowadzona do stałego minimum.

Na węższym końcu rury były zrobione pilnikiem dwie kreski, jedna przy *d*, druga przy *e*, w odległości 10 mm. jedna od drugiej; wyznaczałem pojemność rurki od znaczka, zrobionego przy *a*, do *d*, jak również pojemność od tego samego znaczka do *e*, zapomocą napełniania rtęcią przy znanej temperaturze i ważenia.

— — — — — — — — — — — — — — — — — — — —

Rurki włoskowate były bardzo starannie skalibrowane, i ich przeciętna pojemność była wyznaczona zapomocą ważenia słupka rtęci, którego długość i miejsce, jakie zajmował w rurce, były dokładnie



Rys. 54.

badane. Jeden milimetr rury z powietrzem, użytej do badań, miał przeciętnie pojemność 0,00002477 cm^3, a jeden milimetr rurki z bezwodnikiem węglowym — 0,00003376 cm^3.

— — — — — — — — — — — — — — — — — — — —

Dla większej jasności opisałem te zabiegi tak, jak gdyby one były wykonywane przy użyciu rurki, wziętej osobno. W rzeczywistości, rurka była umocowana w oprawie mosiężnej (rys. 59), zanim została napełniona gazem.

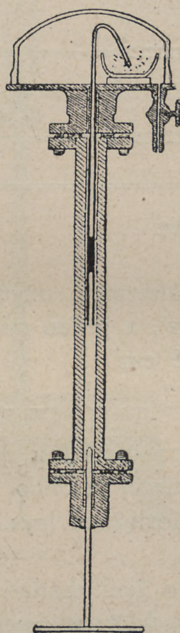
Budowa przyrządu używanego do tych badań jest łatwo zrozumiała z rysunku (rys. 55 i 56), na którym jest on przedstawiony w prostej postaci. Dwie masywne oprawy mosiężne były silnie umocowane na końcach bardzo mocnej rury miedzianej, wyciągniętej na zimno; przy ich pomocy mogły być na końcach rury miedzianej bezpiecznie zaśrubowane dwa mosiężne zakończenia; dwa skórzane pierścienie wytwarzały szczelne połączenie. Dolne zakończenie (rys. 59) zaopatrzone jest w stalową śrubę, długą na 180 mm., o grubości 4 mm. i o wysokości kroku 0,5 mm. Śruba jest starannie wyrznięta i łatwo wytrzymuje ciśnienie 400 i więcej atmosfer. Podobne zakończenie na górnej oprawie obejmuje rurę szklaną, zawierającą gaz, który ma być zgęszczony (rys. 59). Zanim przyrząd był zaśrubowa-

ny, był on napełniony wodą, na którą wywieramy ciśnienie przez wśrubowywanie stalowej śruby.

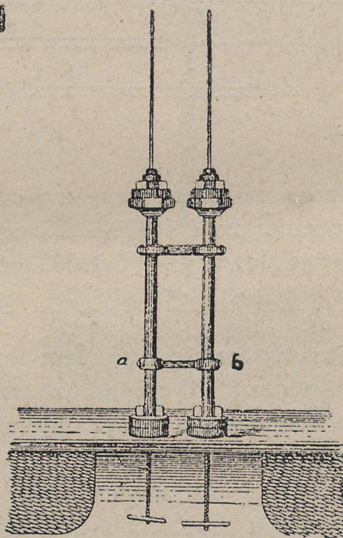
W przyrządzie złożonym (rys. 57 i 58) [służącym do jednoczesnego poddawania dwu gazów temu samemu ciśnieniu, jednym z tych gazów było powietrze, drugim bezwodnik węglowy] wewnętrzne urządzenia są takie same, jak i w prostym. Obiedwie części przyrządu



Rys. 55.



Rys. 56.

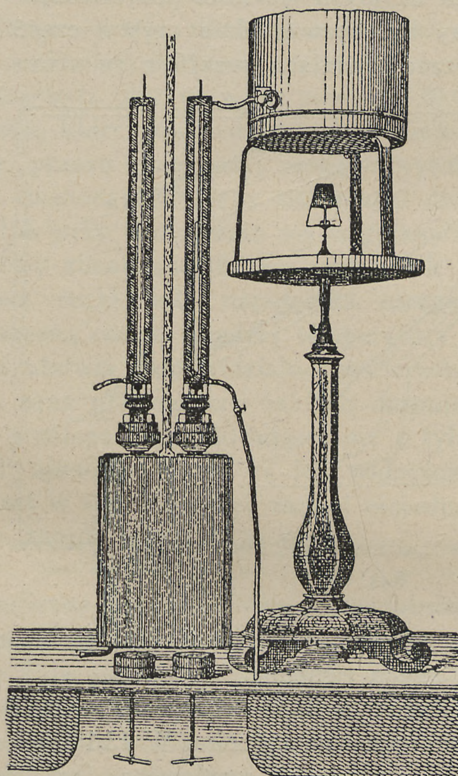


Rys. 57.

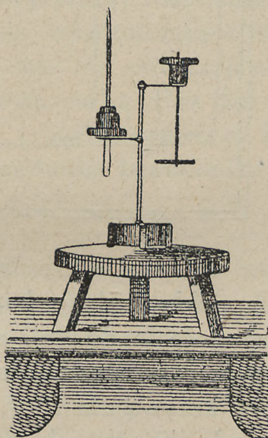
są ze sobą połączone rurką (*ab*). Jest rzeczą obojętną, którą z dolnych śrub będziemy wkręcali, gdyż ciśnienie natychmiast rozejdzie się wewnątrz obydwu rur miedzianych i za pośrednictwem ruchomego słupka rtęci będzie wywierane na obydwa gazy, które mamy zgęścić... Rys. 58 przedstawia ten sam przyrząd z urządzeniami, służącemi do utrzymania stałej temperatury rurek włoskowatych i całego przyrządu. Każdą rurkę włoskowatą otacza prostokątna skrzynka mosiężna, zamknięta z przodu i z tyłu płytkami szklanemi, co

pozwala na doprowadzenie rurki włoskowatej do dowolnej żądanej temperatury zapomocą strumienia wody.

Temperatura wody, otaczającej rurę z powietrzem, była o ile możności równa temperaturze pokojowej, podczas gdy temperatura wody, otaczającej rurę z bezwodnikiem węglowym, wahała się w różnych doświadczeniach od 13° C. do 48° C... Objętości powietrza i bez-



Rys. 58.



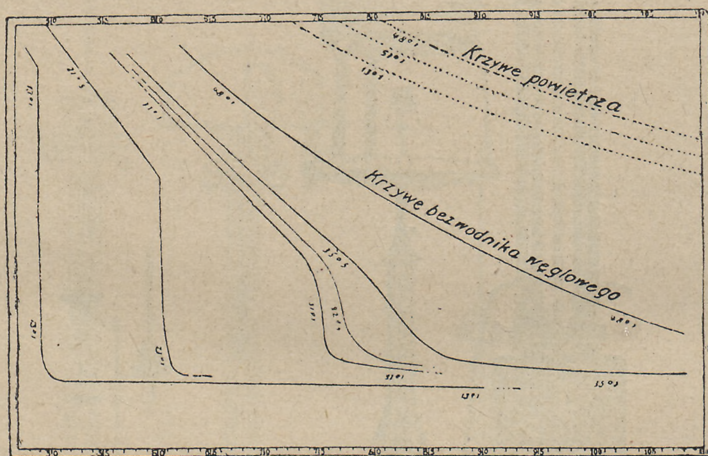
Rys. 59.

wodnika węglowego były dokładnie odczytywane zapomocą katetometru, z dokładnością większą, niż 0,05 mm. Temperatura wody dookoła rury z bezwodnikiem węglowym była wyznaczana zapomocą termometru o dowolnej skali, dokładnie przezemnie skalibrowanego. Termometr ten był jednym z czterech, które zbudowałem przed paru laty i które tak dobrze się ze sobą zgadzały, że różnice w ich wskazaniach, sprowadzone do stopni, nie mają żadnego znaczenia.

Nie próbowałem z obserwowanych zmian objętości powietrza w rur-

ce wyprowadzać odpowiednich ciśnień. Do tego byłoby rzeczą konieczną znać odchylenie powietrza od prawa M a r i o t t e'a przy ciśnieniach, używanych w tych doświadczeniach, jak również zmiany objętości rurki włoskowatej, wywołane przez ciśnienie wewnętrzne... Jest jednak rzeczą samą przeż się zrozumiałą, że, gdy mówiłem czasem o ciśnieniach, jakie wykazywało pozorne skurczenie powietrza w rurze, zawsze miałem na myśli wartości przybliżone.

Gdyby bezwodnik węglowy był bezwzględnie czysty, część krzywej dla 13,11° (rys. 60), przedstawiającą przejście ze stanu gazo-



Rys. 60.

wego w ciekły, byłaby, bezwątpienia, w całym swym przebiegu prosta i równoległa do linji równego ciśnienia.

Krzywa, przedstawiająca wyniki w 21,5° zgodna jest naogół co do postaci z krzywą dla 13,1°, co widać na rysunku. W 13,1° pod ciśnieniem około 49 atm. objętość bezwodnika węglowego jest niewiele większa od $^3/_5$ objętości, jakąby w tych samych warunkach posiadał gaz trwały. Po skropleniu dwutlenek węgla silniej się sprzeciwia ściskaniu, niż ciecze zwykłe, i ściśliwość zdaje się zmniejszać ze wzrostem ciśnienia. Silną rozszerzalność cieplną ciekłego bezwodnika węglowego po raz pierwszy zauważył T h i l o r i e r, te zaś badania najzupełniej jego obserwację potwierdzają.

Następny szereg doświadczeń był wykonany przy 31,1°, to zn. o 0,2° ponad punktem, przy którym bezwodnik węglowy może pod działaniem jedynie zgęszczenia przybrać widoczną postać cieczy. Od czasu, gdy w r. 1863 po raz pierwszy ogłosiłem ten fakt, wykonałem

staranne badania w celu dokładnego wyznaczenia temperatury tego punktu krytycznego dla bezwodnika węglowego. W trzech doświadczeniach wypadło na nią 30,92° C. lub 87,7° F. Chociaż przy nieco większej liczbie stopni ponad tą temperaturą zachodził przy powiększaniu ciśnienia nagły spadek, gdy się doprowadzało gaz do objętości, przy której należało się spodziewać jego skroplenia, to jednak nie rozpadał się on na dwa różne stany skupienia, przynajmniej działanie światła nie wykazało żadnych śladów takiego rozpadu. Gdy zmieniłem ciśnienie i temperaturę, przyczem jednak ta ostatnia zawsze była utrzymywana powyżej 30,92°, wówczas wielkie zmiany gęstości, które powstawały w tym punkcie, wywoływały opisane już wyżej przeze mnie ruchy smug w wysokim stopniu podobne do zjawisk, zachodzących przy zmieszaniu dwu niejednakowo gęstych cieczy lub przy wznoszeniu się nagrzanych słupów powietrza poprzez warstwy zimniejsze. Łatwo można tak dobrać ciśnienie, żeby jedna połowa rurki była napełniona niezgęszczonym gazem, druga zaś zgęszczoną cieczą. Poniżej temperatury krytycznej rozpoznanie tego stanu ułatwia nam widzialna powierzchnia, odgraniczająca ciecz od gazu, oraz przesunięcie, jakiego doznaje na tej powierzchni obraz linji prostopadłej, znajdującej się z tyłu za rurką. Powyżej jednak 30,92° zjawiska te nie są już widoczne, i najstaranniejsze badanie nie jest w stanie wykryć żadnej niejednorodności bezwodnika węglowego, znajdującego się w rurce.

— — — — — — — — — — — — — — — — — — —

Graficzne przedstawienie tych doświadczeń na rys. 60 wykazuje godne uwagi odchylenia krzywych dla niższych temperatur. Kropkowane linje na figurze przedstawiają części krzywych gazu trwałego (mającego w 0° i pod ciśnieniem jednej atmosfery tę samą objętość, co bezwodnik węglowy) w temperaturach 13,1°, 31,1° i 48,1°. Objętość bezwodnika węglowego w temperaturze 31,1° zmniejsza się, jak widać, ze znośną prawidłowością, lecz prędzej, niż według prawa B o y l e'a, dopóki ciśnienie nie dojdzie prawie do 73 atmosfer. Wtedy objętość zmniejsza się bardzo prędko, spada prawie do połowy, podczas gdy ciśnienie podnosi się od 73 do 75 atmosfer, to zn. tylko o $^1/_{37}$ ciśnienia całkowitego. Zmniejszenie nie jest jednak tak gwałtowne, jak przy tworzeniu się cieczy w niskich temperaturach, lecz do wytworzenia go jest konieczny ciągły wzrost ciśnienia. Podczas tego zmniejszania na żadnym stopniu przemiany niema, jak to już było wskazane, ani śladu istnienia w rurce dwu stanów skupienia.

— — — — — — — — — — — — — — — — — — —

Krzywa 32,5° (rys. 60) jest dokładnie podobna do krzywej 31,1°. Spadek jej jest jednak o wiele mniej stromy, niż w tamtej temperaturze... Krzywa 48,1° jest bardzo ciekawa. Spadek widoczny w krzywych niższych temperatur znikł, jeżeli nie całkowicie, to w znacznym stopniu. Jednocześnie kurczenie jest o wiele większe, niż to, jakieby zachodziło, gdyby prawo Mariotte'a obowiązywało w tej temperaturze...

Przy temperaturach wyższych od 48,1° nie robiłem żadnych pomiarów; jest jednak jasne, że w miarę, jak temperatura wzrasta, krzywe będą się nieustannie przybliżały do tych, które wyobrażają zmianę objętości gazu trwałego. Bez robienia dokładnych pomiarów poddawałem częto bezwodnik węglowy ciśnieniom o wiele wyższym, niż podane w tablicy, i przeprowadzałem go stopniowo ze stanu, który każdy uważa za gazowy, do stanu, który jest powszechnie uważany za ciekły.

Biorę np. daną objętość bezwodnika węglowego o 50° C. lub o wyższej temperaturze i poddaję ją ciśnieniu, wzrastającemu do 150 atmosfer. Wtedy objętość jego będzie się stale zmniejszała w miarę powiększania ciśnienia, i przy żadnej wartości ciśnienia nie nastąpi nagłe zmniejszenie objętości, o ile nie będzie użyte zewnętrzne ciśnienie. Jeżeli, gdy jest już użyte całe ciśnienie, obniżymy temperaturę bezwodnika węglowego do zwykłej temperatury atmosfery, to podczas całej tej przemiany nie zajdzie żadna zmiana w ciągłości. Mamy na początku gaz, i po całym szeregu powolnych przemian, nigdzie nie wykazujących nagłego zmniejszenia się objętości lub raptownego wywiązywania się ciepła, kończymy na cieczy. Najstaranniejsze badanie nie może nigdzie znaleźć wskazówki, że bezwodnik węgla zmienił swój stan skupienia lub w jakimkolwiek okresie przemiany znajdował się częściowo w jednym, częściowo w drugim stanie fizycznym. Niktby się nie domyślił, że gaz istotnie zmienił się w ciecz, gdyby tego nie można była ujawnić przez wrzenie, które następuje po usunięciu ciśnienia. Dla dogodności podzieliliśmy tę przemianę na dwie części: zgęszczenie bezwodnika węglowego i następnie ochłodzenie. Obie te przemiany mogłyby być jednak wykonane jednocześnie, gdyby ciśnienie i ochłodzenie były tak regulowane, żeby przy ochłodzeniu bezwodnika węglowego do 31°, ciśnienie nigdy nie spadało poniżej 76 atmosfer.

Jesteśmy obecnie przygotowani do rozważania następującego ważnego pytania: jaki jest stan bezwodnika węglowego, gdy w temperaturze powyżej 31° przechodzi ze stanu gazowego do objętości cie-

czy, nie wykazując w żadnym momencie oznak zachodzącego skroplenia? Czy pozostaje w stanie gazowym, czy też staje się ciekłym, czy wreszcie mamy tu do czynienia z nowym stanem skupienia. Gdyby doświadczenie było wykonane w temperaturze 100° lub wyższej, gdzie brakłoby wszystkich oznak zgęszczenia, to prawdopodobną byłaby odpowiedź, że gaz podczas zgęszczenia zachował swój stan gazowy i niewiele osób wahałoby się uważać tę odpowiedź za słuszną, jeżeliby ciśnieniu były poddane, jak w doświadczeniach Natterer'a, gazy takie, jak wodór i azot. Z drugiej strony, ponieważ doświadczenie z bezwodnikiem węglowym było wykonywane w temperaturze nieco wyższej od 31°, to większe przyciąganie wzajemne [między drobinami gazu], które zjawia się w pewnym okresie przemiany, doprowadziłoby do mniemania, że istotnie zachodzi skroplenie, chociaż w żadnym momencie nie mogłaby być wykryta starannemi próbami optycznemi obecność cieczy w zetknięciu z gazem. Temu zaś poglądowi można postawić zarzut, oparty na mocnych podstawach, że fakt, iż do dalszego zmniejszania objętości ciągle jest potrzebne zwiększenie ciśnienia, jest w sprzeczności ze znanemi prawami, tyczącemi się przejścia ciał ze stanu gazowego do ciekłego. Im wyższa pozatem jest temperatura, przy której gaz jest zgęszczany, tem mniejsze jest wzajemne przyciąganie i w końcu znika zupełnie.

Z objaśnienia opisanych doświadczeń, które wydaje mi się słusznem, wypływa odpowiedź na postawione pytanie, a to przez wprowadzenie ścisłych związków, jakie istnieją między stanem skupienia gazowym i ciekłym. Zwykły stan gazowy i zwykły stan ciekły są, krótko mówiąc, jedynie daleko od siebie odsuniętemi postaciami tego samego stanu i mogą przechodzić jeden w drugi przez szereg stopniowych przemian w ten sposób, że nigdzie w tem przejściu nie można zauważyć przerwy lub zakłócenia ciągłości; — od bezwodnika węglowego, jako zupełnego gazu, do bezwodnika węglowego, jako zupełnej cieczy, możemy przejść, jak widzimy, zapomocą procesu ciągłego; tak że gaz i ciecz są jedynie ciągłemi stopniami długiego szeregu ciągłych przemian fizycznych. W pewnych warunkach temperatury i ciśnienia znajduje się, coprawda, bezwodnik węglowy w stanie poniekąd niestałym, i bez dodatkowego użycia ciśnienia lub zmiany temperatury przybiera, wywiązując jednocześnie ciepło, taką objętość, do której mógłby dojść na znacznie dłuższej drodze. Przy nagłej zmianie, która tu zachodzi, zaznacza się podczas przebiegu procesu wyraźna różnica między optycznemi i pozostałemi własno-

ściami fizycznemi tego bezwodnika węglowego, który jest doprowadzony do mniejszej objętości i tego, który jeszcze zmianie żadnej nie uległ. W tym więc przypadku odróżnienie gazu od cieczy nie przedstawia żadnej trudności. W innych jednak wypadkach rozróżnienie to nie jest możliwe.

— — — — — — — — — — — — — — — — — — —

Wybitny fizyk Cagniard de la Tour wywnioskował na zasadzie swych doświadczeń, że ciecz znika i zamienia się w gaz. Drobna zmiana w jego doświadczeniach doprowadziłaby go do przeciwnego wniosku: że to, co było przedtem gazem, zamieniło się w ciecz. Jednem słowem, stany te są stanami przejściowemi, które przybiera materja, gdy przechodzi bez nagłej zmiany objętości lub nagłego wywiązania się ciepła ze stanu zwykłej cieczy do stanu zwykłego gazu.

— — — — — — — — — — — — — — — — — — —

Opisane w niniejszej pracy własności bezwodnika węglowego nie są tylko jemu właściwe, lecz spotykane są powszechnie we wszystkich ciałach, które mogą być otrzymane, jako gazy i jako ciecze. Tlenek azotu, amoniak, eter siarczany i siarczek węgla, wszystkie wykazują w oznaczonych ciśnieniach i temperaturach punkty krytyczne i nagłe zmiany objętości ze smugami wzlatującemi do góry, gdy zmieniamy temperaturę lub ciśnienie w pobliżu tych punktów...

Odróżnianie pary i gazu było do dziś dnia oparte na dowolnych zasadach. Eter w stanie gazowym nazywamy parą, dwutlenek siarki zaś w tym samym stanie gazem; obydwa są jednak parami, z których jedna pochodzi z cieczy, wrzącej przy 35°, druga zaś z cieczy, wrzącej przy —10°. Odróżnianie jest przeto uwarunkowane tą drobną okolicznością, że punkt wrzenia cieczy pod zwykłem ciśnieniem atmosferycznem leży wyżej lub niżej od zwykłej temperatury atmosfery. Podobne odróżnianie może mieć pewne praktyczne korzyści: pod względem naukowym jest ono bez wartości. Punkt krytyczny może służyć, jako cecha do odróżnienia par od gazów, jeżeli wogóle będziemy nadal uważali za rzecz ważną utrzymanie tego odróżnienia. Wiele własności par pochodzi stąd, że gaz i ciecz stykają się ze sobą, a to może zajść, jakeśmy widzieli, jedynie w temperaturach poniżej punktu krytycznego. Możemy tedy powiedzieć: para jest to gaz w dowolnej temperaturze poniżej swego punktu krytycznego. Według tego określenia para może być zamieniona w ciecz przez samo tylko ciśnienie i może przeto istnieć w obecności swej własnej cieczy, podczas gdy gaz nie może być skroplony przez ciśnienie, to

zn. nie może być tak zmieniony zapomocą ciśnienia, aby można było odróżnić ciecz, oddzieloną odeń widzialną powierzchnią. Według tego określenia bezwodnik węglowy poniżej 31° jest parą, powyżej 31° gazem, eter poniżej 200° parą, powyżej — gazem.

Jakeśmy widzieli, stan gazowy i stan ciekły są jedynie oddalonemi od siebie stopniami jednego i tego samego stanu skupienia; mogą one przejść jeden w drugi w procesie o przemianach ciągłych. Pozostaje jeszcze do rozstrzygnięcia zagadnienie o wiele trudniejsze: możliwa ciągłość stanów skupienia ciekłego i stałego. Piękne odkrycie, dokonane przed paru laty przez Jamesa Thomsona i potwierdzone doświadczalnie przez Sir W. Thomsona[1], dotyczące wpływu ciśnienia na temperaturę, w której zachodzi topnienie, wyznacza, według mnie, kierunek, w jakim muszą być prowadzone badania; przynajmniej dla tych ciał, które się przy topnieniu rozszerzają i dla których ciśnienie podnosi punkt topnienia, przejście takie jest wykonalne. To jednak musi być przedmiotem dalszych badań; obecnie nie ośmielam się przekraczać granic wniosku, opartego na badaniach bezpośrednich: że stany skupienia gazowy i ciekły mogą przechodzić jeden w drugi przez szereg ciągłych zmian".

Z pracy Andrewsa jasno wynikało, że dla skroplenia gazów trwałych nie dość jest poddać je ściśnieniu, lecz należy również obniżyć ich temperaturę poniżej temperatury krytycznej. Nie było to rzeczą łatwą, a to ze względu, że temperatura krytyczna gazów trwałych leży, jak to wykazały doświadczenia poprzednie, znacznie niżej od temperatur, które można było otrzymać zwykłemi sposobami. Prawda, że w termodynamice już od dość dawna znany był teoretycznie sposób otrzymywania znacznych obniżeń temperatury przez poddawanie gazów rozprężaniu adiabatycznemu, sposób ten jednak, choć ujęty w ścisłe wzory, mało był podówczas stosowany w doświadczeniach. Nic też dziwnego, że pierwszy z uczonych, który po pracy Andrewsa przystąpił do badania gazów, Louis Cailletet, rozpoczynając swą pracę, nie miał najmniejszego zamiaru używać tego sposobu do otrzymywania niskich temperatur. Przyrząd jego, mający początkowo służyć jedynie do badania ściśliwości gazów, składał się z mocnego naczynia stalowego, napełnionego rtęcią; rtęć ta pod ciśnieniem wody w prasie hydraulicznej wchodziła do rurki szklanej, wypełnionej badanym gazem. Z boku

---

[1]) Patrz niżej „Zasady termodynamiki".

przyrządu znajdował się kran, przez który można było usunąć wodę cisnącą na rtęć. W czasie jednego z doświadczeń kran ten przypadkowo się otworzył, i wtedy Cailletet zauważył wewnątrz rurki obłok. Powstanie tego obłoku przypisał początkowo zanieczyszczeniom gazu przez parę wodną. Przedsięwziął zatem wszelkie środki ostrożności, aby w następnem doświadczeniu użyć możliwie czystego gazu; mimo to jednak obłok tworzył się za każdym razem, gdy kran był nagle otwierany. Nie mogło być więc wątpliwości, że istotnie, mimo warunków pozornie nieprzyjaznych (wąska rurka, wpływ cieplny ścianek naczynia, niewielka ilość gazu), zachodziło rozprężenie adiabatyczne. Cailletet tym sposobem znalazł się w posiadaniu sposobu otrzymywania niskich temperatur. Prowadząc badania nad tlenkiem węgla i tlenem, dnia 2 grudnia 1877 r. zauważył w rurce tak gęsty obłok, że mógł go przypisać obecności pary tlenu bliskiej skropleniu, o czem natychmiast zawiadomił członka Akademji francuskiej Sainte-Claire Deville'a. Z urzędowem jednak zawiadomieniem Akademji Cailletet nie spieszył, a to ze względów następujących: w owym czasie ważyły się losy jego kandydatury na członka Akademji; ogłoszenie przez niego tak świetnych wyników pracy mogłoby sprawić wrażenie, że chce on tym sposobem wywrzeć pewien nacisk na Akademję. Wybór Cailleteta na członka Akademji nastąpił na posiedzeniu z d. 17 grudnia 1877; na następnym posiedzeniu d. 24 grudnia 1877 r. miał być podany do wiadomości ogółu komunikat Cailleteta o skropleniu tlenu. Na dwa dni jednak przed posiedzeniem, sekretarz Akademji otrzymał od uczonego szwajcarskiego Raoula Picteta depeszę, donoszącą, że udało mu się skroplić tlen. Na szczęście dla Cailleteta zachowany został list jego, pisany do Sainte-Claire Deville'a w pierwszych dniach grudnia. Przezorny Sainte-Claire Deville złożył list ten zaraz po odebraniu w sekretarjacie Akademji w zamkniętej kopercie. Tym sposobem Cailletet mógł dowieść swego pierwszeństwa.

Metoda, użyta przez Picteta, różniła się zasadniczo od metody Cailleteta. Pictet otrzymywał niskie temperatury stopniowo, używając, jako ciał chłodzących, gazów o coraz to niższej temperaturze wrzenia. „Cykl", użyty przez Picteta, był następujący: za punkt wyjścia służył gaz, łatwo się skraplający, a mianowicie SO_2; gaz ten, wrząc pod zniżonem ciśnieniem, dochodził do temperatury -65^0, której udzielał bezwodnikowi węglowemu, mogącemu być skroplonym w tej temperaturze pod niewielkiem nawet ciśnieniem.

Skroplony bezwodnik węglowy był odprowadzany do innego naczynia, gdzie, wrząc pod zniżonem ciśnieniem, oziębiał się, według Picteta, do —130° i wywoływał tym sposobem skroplenie tlenu, znajdującego się pod ciśnieniem, większem od 200 atmosfer. O ile piękną była sama metoda, zastosowana następnie w większych rozmiarach do skroplenia helu przez Kamerlingha Onnesa, o tyle pewna część badań Picteta, a zwłaszcza jego dane liczbowe, okazały się z gruntu błędnemi.

W pracy o skraplaniu wodoru Pictet pisze, że wodór skroplony, który miał powstawać w temperaturze —140°, jest koloru niebieskiego i, spadając na ziemię, wydaje odgłos taki, jak opiłki metalowe. Późniejsze badania dowiodły jednak, że w temperaturze —140° nie można otrzymać ciekłego wodoru, gdyż jego temperatura krytyczna leży poniżej 200°, pozatem ciekły wodór jest płynem bezbarwnym, bardzo lekkim i niesłychanie ruchliwym.

W każdym razie ani Cailletetowi, ani Pictetowi nie udało się zebrać ciekłego tlenu; prace ich dowiodły jedynie, że tlen może być skroplony przy pomocy środków, znajdujących się w naszem rozporządzeniu.

Otrzymanie tlenu, jako cieczy w stanie równowagi, było zasługą dwu polskich fizyków Zygmunta Wróblewskiego i Karola Olszewskiego. W doświadczeniach swoich posiłkowali się oni metodą Cailleteta z tą jednak zasadniczą zmianą, że gaz, poddawany rozprężeniu, był uprzednio oziębiony przez etylen, wrzący pod zmniejszonem ciśnieniem. Dnia 9 kwietnia 1883 roku został ostatecznie skroplony tlen, wkrótce potem azot i tlenek węgla. Te dwa ostatnie gazy zostały również otrzymane w stanie stałym.

WRÓBLEWSKI (Zygmunt Florenty) [1], jeden z najznakomitszych fizyków polskich, urodził się w Grodnie 28 października 1845 r. Ukończywszy gimnazjum grodzieńskie w 1862 roku, udał się na uni-

---

[1]) Dane biograficzne, przytoczone w tekście zawdzięczam ś. p. Bronisławowi Znatowiczowi, który mi wskazał obszerny życiorys Wróblewskiego, napisany przez E. Dziewulskiego i wydrukowany we „Wszechświecie" z 1886 roku.

ZNATOWICZ (Bronisław) ur. w 1851 r. um. w 1917 r. Był współzałożycielem, a następnie długoletnim kierownikiem jedynego wówczas popularno-naukowego polskiego czasopisma przyrodniczego „Wszechświat". Przez cały szereg lat, pracując w niezwykle ciężkich warunkach, skupił koło pisma przez siebie redagowa-

wersytet do Kijowa. Burzliwy jednak okres czasu, jaki wtedy nadszedł, nie pozwolił mu ukończyć studjów. Wziął on czynny udział w powstaniu 1863 roku, skutkiem czego został 23 lipca 1863 roku aresztowany i w końcu 1864 roku zesłany początkowo do Tomska, następnie do Kazania. Uwolniony po pięcioletniem zesłaniu, wrócił w 1869 roku do Warszawy, gdzie jednak silna choroba oczu nie pozwoliła mu długo zostawać. Na skutek rady lekarzy wyjechał na kurację do Berlina. Okoliczności tej nauka polska wiele zawdzięcza, gdyż w Berlinie Wróblewski, uczęszczając na wykłady fizyki Magnusa, Quinckego, Poggendorffa odświeżył swoje wiadomości z tej dziedziny. Wtedy też powstały plany obszernych prac naukowych, opartych na nowej zupełnie teorji. Jaka to była teorja, dokładnie nie wiemy. Wiemy tylko, że wspominał on o niej Clausiusowi, z którym się zapoznał na wycieczce w Szwajcarji. Clausius dał mu radę, aby sprawdził doświadczalnie możliwość takiej teorji. Taką samą radę otrzymał od Helmholtza, do którego pojechał początkowo do Heidelberga, następnie zaś po przeniesieniu Helmholtza — do Berlina. Rada Clausiusa i Helmholtza była, bezwątpienia, słuszna, dla Wróblewskiego jednak prawie niewykonalna. Jego położenie materjalne było bowiem podówczas dość smutne. Zmuszony zarabiać pisywaniem korespondencyj do gazet, nie miał pieniędzy na opłacenie miejsca w laboratorjum. Opanowało go też, zwłaszcza po rozmowie z Helmholtzem, pewne zniechęcenie. Chwycił się jednak środka heroicznego: do wszystkich prawie profesorów uniwersytetów niemieckich rozpisał listy, ofiarowując usługi swe w charakterze asystenta wzamian za możność pracowania w laboratorjum. Na ten list odpisał prof. Jolly z Monachjum, proponując mu bezpłatne korzystanie z laboratorjum. Na skutek tej odpowiedzi Wróblewski pojechał w 1872 r. do Monachium, gdzie w 1874 r. ogłosił pierwszą swą pracę p. t. „Badania nad wzbudzaniem elektryczności środkami mechanicznymi" („Untersuchungen über die Erregung der Elektri-

---

nego wszystkich, którzy w ten lub inny sposób starali się utrzymać styczność z zagadnieniami naukowemi. Jego to głównie działalność, skromna i pozbawiona rozgłosu, sprawiła, że nie została zerwana w b. zaborze rosyjskim łączność pracy poprzednich pokoleń i obecnego. Znakomity znawca języka czuwał nad jego czystością, jemu też i Witkowskiemu zawdzięczamy zachowanie pięknego i bogatego słownictwa naukowego. Tego typu ludzie, co Znatowicz, hartowni i nieskazitelni, ocalili w owych ponurych czasach znaczną część Polski od zamienienia się w duchową i umysłową pustynię.

zität durch mechanische Mittel"), za którą otrzymał tytuł doktora filozofji „summa cum laude".

W tym samym roku otrzymał posadę asystenta przy Kundt'cie, podówczas profesorze strasburskiego uniwersytetu. Wtedy zajął się badaniem własności gazów. Rozprawa o dyfuzji gazów przez ciała pochłaniające była przyjęta przez senat, jako rozprawa habilitacyjna, i zapewniła mu docenturę w Strasburgu. Do tego okresu czasu należą jego prace nad dyfuzją gazów i nad istotą zjawiska pochłaniania gazów. Nazwisko Wróblewskiego zaczynało coraz bardziej być znanem w kołach fizyków. Uznanie dla prac, przez niego wykonanych, wyraziło się w propozycji, jaką Wróblewski otrzymał w 1878 r., objęcia katedry fizyki w Yeddo, w niemieckiej Akademji medycznej. Los, przychylny w danym wypadku nauce polskiej, sprawił, że propozycja ta spełzła na niczem, gdyż profesor, którego miejsce miał zająć Wróblewski, nagle zdecydował się pozostać na stanowisku, wobec czego kandydatura Wróblewskiego, rzecz prosta, upadła. W 1880 roku Wróblewski wyjechał do Paryża; natknął się tam jednak na nieprzewidziane trudności. Docentura, jaką zajmował w Strasburgu, od niedawna dopiero zaanektowanym przez Niemcy, zamknęła przed nim drzwi laboratorjów paryskich. Ta okoliczność była prawdopodobnie jednym z powodów goryczy, z jaką wówczas scharakteryzował naukę francuską w pracy, wydanej po polsku. Charakterystyka ta niezawsze była słuszna, co zresztą musiał, prawdopodobnie, przyznać później sam Wróblewski, gdy po krótkim pobycie w Anglji zaczął pracować w laboratorjum prof. Debraya w Ecole Normale Supérieure i bliżej przyjrzał się nauce francuskiej, która wkrótce przy końcu wieku XIX-go miała zajaśnieć gwiazdami naukowemi pierwszorzędnej wielkości.

Pracując w dalszym ciągu nad gazami, a mianowicie nad pochłanianiem gazów pod wysokiem ciśnieniem, zapoznał się z pracami i metodą Cailleteta. W 1882 roku mógł nareszcie zająć się pracą naukową w kraju, gdy po śmierci prof. Kuczyńskiego objął katedrę fizyki w Uniwersytecie Jagiellońskim. Pole do pracy otwierało się przed Wróblewskim olbrzymie. Poza umiłowaną przezeń pracą naukową, czekała go ciężka praca pedagogiczna; trzeba było bowiem nowe metody nauczania, z któremi się zapoznał za granicą, przenieść i zaszczepić w kraju, podnieść poziom laboratorjów fizycznych. Na szczęście pomoc, jaką znalazł u kolegi swego, również profesora Uniwersytetu Jagiellońskiego, Olszewskiego, umożliwiła im obydwóm dokonanie pracy, o której już wyżej

była mowa, — otrzymania tlenu ciekłego w stanie statycznym.

Niepowodzenia jednak, jakie spotkały polskich badaczów przy próbach skraplania wodoru, skłoniły Wróblewskiego do systematycznego zbadania ściśliwości wodoru. Pracy tej nie skończył, zdążywszy opracować tylko dziewięć rozdziałów. Rysując na rajzbrecie krzywą ściśliwości wodoru, Wróblewski przewrócił lampę i oblany płonącą naftą umarł w strasznych męczarniach 16 kwietnia 1886 r. Tragiczny ten wypadek, przerywając działalność naukową Wróblewskiego w jej prawdziwym rozkwicie, pozbawił naukę uczonego wielkiej miary, po którym wielu jeszcze cennych prac spodziewać się należało.

OLSZEWSKI (Karol Stanisław) ur. się 29 stycznia 1846 roku w Broniszowie (Galicja); po ukończeniu nauk w Sączu i Tarnowie, wstąpił na Uniwersytet Krakowski, gdzie wkrótce w roku 1871 został asystentem przy katedrze chemji. W 1872 r. doktoryzował się u Bunsena w Heidelbergu, poczem w 1876 r. został nadzwyczajnym, a w 1891 r. zwyczajnym profesorem chemji na Uniwersytecie Jagiellońskim. Liczne jego prace naukowe, które ułamkowo zaledwie omówiliśmy w tekście, zapewniły mu wybitne miejsce między uczonymi europejskimi. Umarł w 1915 r.

O skropleniu tlenu i azotu i o zestaleniu siarczku węgla i alkoholu[1]).

[Dnia 9 kwietnia otrzymał p. Debray od p. Wróblewskiego następującą depeszę: „Tlen skroplony zupełnie ciekły, bezbarwny, jak kwas węglowy. Za dni kilka otrzyma pan komunikat"].

„Piękne prace pp. Cailleteta i Raoula Picteta nad skraplaniem gazów pozwoliły mieć nadzieję, że z czasem będziemy w stanie obserwować tlen, doprowadzony do stanu ciekłego, w rurce szklanej, jak to obecnie czynimy z kwasem węglowym. Jedynym warunkiem było otrzymanie temperatury dostatecznie niskiej. Pan Cailletet w pracy, ogłoszonej przed rokiem[2]), zalecał etylen skroplony, jako środek otrzymania dużego zimna. Ciecz ta, pod ciśnieniem jednej atmosfery, wre w —105° C., jeżeli

---

[1]) „Sur la liquéfaction de l'oxygène et de l'azote, et sur la solidification du sulfure de carbone et de l'alcool" note de MM. S. Wróblewski et K. Olszewski. Comptes Rendus, Tom. 96, str. 1140.

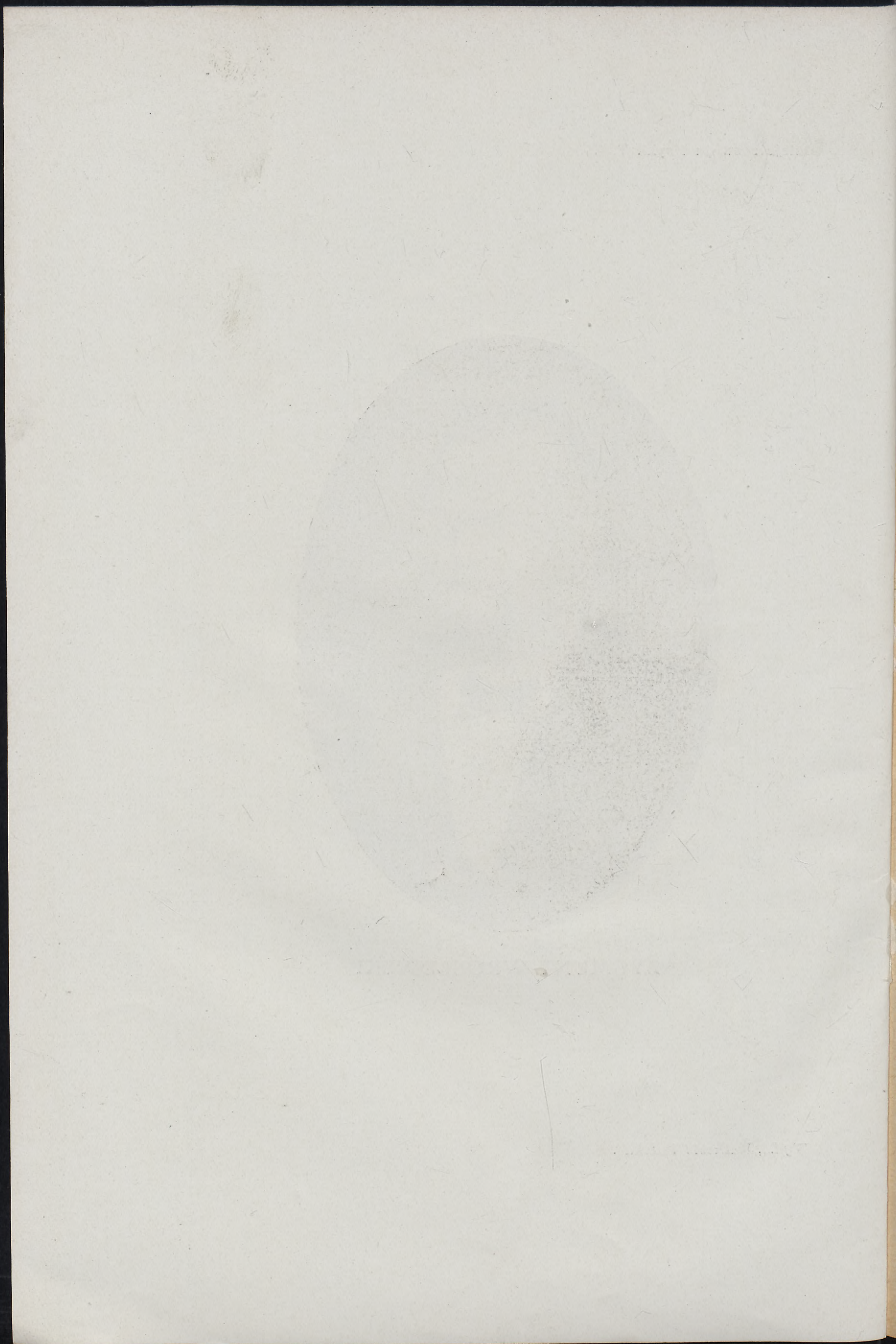
[2]) Comptes Rendus, Tom 94, str. 1224.



ZYGMUNT WRÓBLEWSKI

Wyd. „Mathesis Polska".





mierzymy temperaturę termometrem z siarczkiem węglowym. Zgęściwszy tlen w rurce nieco włoskowatej i ochłodziwszy go w tej cieczy do —105° C., p. Cailletet zauważył w chwili rozprężania „gwałtowne gotowanie się, które trwa dość znaczny przeciąg czasu i przypomina przechodzenie cieczy do ochłodzonej części rury. Gotowanie to odbywa się w pewnej odległości od dna rurki. Nie mogłem rozpoznać, dodaje p. Cailletet, czy ciecz ta istnieje uprzednio czy też tworzy się w chwili rozprężenia, gdyż nie mogłem jeszcze widzieć powierzchni rozdziału gazu i cieczy".

Skorzystawszy z nowego przyrządu, zbudowanego przez jednego z nas[1]) i pozwalającego stosunkowo znaczne ilości gazu poddać ciśnieniu kilkuset atmosfer, postanowiliśmy zbadać temperatury, jakie posiadają gazy podczas rozprężenia. Te doświadczenia wkrótce nas doprowadziły do odkrycia temperatury, w której można zamrozić siarczek węglowy i alkohol i w której tlen z wielką łatwością się skrapla.

Otrzymuje się tę temperaturę, wyparowywując etylen w próżni. Temperatura zależy od stopnia otrzymanej próżni; minimum, któreśmy mogli otrzymać dotychczas, wynosi —136° C. Wyznaczyliśmy tę temperaturę, jak i wszystkie inne, termometrem wodorowym.

Temperatura krytyczna tlenu jest niższa od temperatury, w której wre etylen pod ciśnieniem atmosferycznem. Ta zaś temperatura nie równa się —105° C., jak przyjmowano dotychczas, lecz leży między —102° C. i —103° C., jak to znaleźliśmy przy użyciu naszych termometrów.

Z szeregu doświadczeń, wykonanych przez nas 9 kwietnia, dajemy tytułem przykładu, następujące liczby:

temperatura	ciśnienia w atmosferach, pod któremi tlen zaczyna się skraplać
—131,6	26,5
—133,4	24,8
—135,8	22,5

Ogłaszając te liczby, zachowujemy sobie prawo ogłoszenia w następnej pracy liczb ostatecznych.

Tlen ciekły jest bezbarwny i przezroczysty, jak kwas węglowy. Jest bardzo ruchliwy i tworzy bardzo wyraźny menisk.

---

[1]) Wróblewskiego.

Co do siarczku węgla, to zamarza on w —116° C., topi się w —110° C. Alkohol staje się lepki, jak oliwa, w —129° C. i, zestalając się w —130° C., staje się ciałem białem".

[16 kwietnia sekretarz Akademji p. Debray otrzymał od Wróblewskiego depeszę następującą: „Azot ochłodzony, skroplony przez rozprężanie. Menisk widoczny, ciecz bezbarwna"].

O skropleniu azotu [1].

„Skropliwszy całkowicie tlen, staraliśmy się skroplić azot. Gaz ten, oziębiony w rurce szklanej do —136° C. i poddany ciśnieniu 150 atm., jeszcze się nie skrapla. Nic nie można zauważyć w rurce.

Jeżeli się wywoła nagłe rozprężenie, w całej rurce zajdzie gwałtowne wrzenie. Może ono być porównane jedynie z wrzeniem kwasu węglowego ciekłego w szklanej rurce Natterera, gdy się zanurzy tę rurkę w wodzie, ogrzanej do temperatury nieco wyższej od temperatury krytycznej kwasu węglowego. Ale, jeżeli się wywoła rozprężenie powoli i jeżeli, zmniejszając ciśnienie, nie przekracza się ciśnienia 50 atm., azot skrapla się całkowicie: ciecz posiada wtedy bardzo wyraźny menisk i bardzo prędko paruje.

To też azot pozostaje zaledwie kilka sekund w stanie statycznym cieczy trwałych. Aby móc go dłużej w tym stanie utrzymać, trzebaby mieć do rozporządzenia temperaturę niższą od minimum, któreśmy byli w stanie otrzymać naszym sposobem. Staramy się wyszukać sposoby otrzymania tej temperatury. Azot ciekły jest bezbarwny i przezroczysty, jak tlen i kwas węglowy".

Po skropleniu przez Cailleteta gazu błotnego, pozostał ze znanych podówczas gazów nieskroplony jedynie wodór. Skroplenie tego gazu nie było rzeczą łatwą. W przypadku bowiem gazów, skroplonych przez Wróblewskiego i Olszewskiego, można było obyć się w gruncie rzeczy bez rozprężania, stosując samą tylko metodę „kaskadową". Etylen, parując pod niskiem ciśnieniem, oziębia się do temperatury około —140° C., a więc niższej o wiele od temperatury krytycznej tlenu (—122,4°) i prawie równej temperaturze krytycznej tlenku węgla (—139,5°). Wyparowywanie tlenu, skroplonego w kąpieli ciekłego etylenu, stosunkowo łatwo doprowadzi do temperatury krytycznej azotu (—146°). Ale dalej me-

---

[1] „Sur la liquéfaction de l'azote" note de MM. S. Wróblewski et K. Olszewski, Comptes Rendus, Tom 96, str. 1225.

toda ta już służyć nie może. Wyparowywanie ciekłego azotu obniży temperaturę co najwyżej do —219° C. (temperatury krzepnięcia tego gazu), a więc do wartości o wiele wyższej od temperatury krytycznej wodoru (—240,8°). Temperaturę tę, wyznaczoną teoretycznie przez Wróblewskiego, następnie przez Władysława Natansona, profesora Uniwersytetu Jagiellońskiego, ustalił doświadczalnie Olszewski w 1905 r. Dla otrzymania przeto wodoru w tej temperaturze należy go poddać rozprężaniu. Jak to stwierdzili Joule i Thomson (p. niżej) w 1853 r., gazy rzeczywiste, rozprężając się nawet bez wykonywania pracy, doznają naogół obniżenia temperatury. Wyjątek stanowi wodór, który w granicach zwykłych temperatur ulega w tym przypadku podwyższeniu temperatury. Olszewskiemu zawdzięczamy doświadczalne stwierdzenie, że w temperaturach niższych od —80,5° ta anomalja wodoru znika, i że wtedy można przez tego rodzaju rozprężanie otrzymać obniżenie temperatury wodoru. Przez zużytkowanie tej własności powiodło się w 1898 r. fizykowi angielskiemu J. Dewarowi otrzymać wodór w stanie ciekłym. Dewar oziębiał wodór, znajdujący się pod ciśnieniem 180 atm., do —205° i rozprężał go do ciśnienia atmosferycznego. Należy zaznaczyć, że wcześniej nieco (1896 r.) zjawisko Joule'a i Thomsona znalazło zastosowanie w zbudowanym przez Lindego przyrządzie do otrzymywania w dużych ilościach ciekłego powietrza.

W tych wszystkich doświadczeniach szczególną trudność sprawiały pomiary niskich temperatur. W pierwszych pracach Wróblewskiego i Olszewskiego pomiary były dokonywane przy pomocy termometru wodorowego. Taki termometr jednak już w temperaturach bliskich —200° nie dawał, według zdania Wróblewskiego, dokładnych wskazań, gdyż te temperatury zbyt mało się różniły od temperatury krytycznej wodoru. W 1896 r. Witkowski zbudował bardzo czuły i dokładny oporowy termometr platynowy.

WITKOWSKI (August) ur. w 1854 r. um. w 1913 r. Po studjach na Politechnice Lwowskiej i kilkoletniej pracy w uniwersytetach Krakowskim, Berlińskim i Glasgowskim został w 1881 r. docentem w Politechnice Lwowskiej i szkole rolniczej w Dublanach. Po śmierci Wróblewskiego objął katedrę fizyki doświadczalnej w Uniwersytecie Jagiellońskim. Na tem stanowisku rozwinął owocną działalność naukową i pedagogiczną. Prace jego naukowe miały

i mają wielkie znaczenie dla fizyki gazów; one to wraz z klasycznemi badaniami Regnaulta i Amagata umożliwiły otrzymanie doniosłych wyników, któremi słusznie chlubić się może ta gałąź fizyki. Dla nauki polskiej szczególne znaczenie posiadają: opracowanie trzytomowych „Zasad fizyki", jedynego dotychczas polskiego podręcznika fizyki o poziomie wyższym, obejmującego wszystkie dziedziny tej nauki, i urządzenie instytutu fizycznego w Krakowie, nazwanego mocą uchwały Senatu Uniwersyteckiego, instytutem im. Augusta Witkowskiego.

Z odkrytych przez Ramsaya i Rayleigha pięciu gazów: neonu, argonu, ksenonu, kryptonu i helu cztery pierwsze posiadają temperaturę krytyczną wyższą od temperatury krytycznej wodoru (ksenon +14,7°, krypton —62,5°, argon —122,4° i neon około —218°), to też łatwo można je było otrzymać w stanie ciekłym. Natomiast przy skraplaniu helu napotkano te same przeszkody, co poprzednio przy wodorze. Najniższa bowiem temperatura, jaką można otrzymać przez wyparowanie ciekłego wodoru pod zmniejszonem ciśnieniem wynosi —258°, temperatura zaś krytyczna helu równa jest, jak się z późniejszych pomiarów okazało, —267,84°. W dodatku t. zw. temperatura odwrócenia, t. zn. temperatura, od której poczynając zjawisko Joule'a i Thomsona wykazuje dla danego gazu obniżenie temperatury, jest dla helu wyjątkowo niska, około —240° C. Do tej więc temperatury należy hel oziębić, ażeby móc później przez zabieg analogiczny do używanego przy skraplaniu wodoru otrzymać hel w stanie ciekłym. Nic też dziwnego, że wysiłki Olszewskiego, który doprowadził hel do temperatury —263,9°, a więc prawie do 9 stopni skali bezwzględnej, nie dały pożądanego wyniku. Dopiero Kamerlinghowi Onnesowi udało się d. 10 czerwca 1908 r. otrzymać 60 cm³ ciekłego helu.

KAMERLINGH ONNES (Heike) um. w 1926 roku, profesor uniwersytetu Lejdejskiego, założyciel i pierwszy kierownik laboratorjum niskich temperatur. Z prac Kamerlingha Onnesa, wykonanych w tem laboratorjum, na szczególną uwagę zasługuje odkrycie bardzo ważnych zjawisk w dziedzinie przewodnictwa elektrycznego metali i ciepła właściwego ciał stałych. Wyparowywując ciekły hel pod ciśnieniem 3 cm. rtęci, Kamerlingh Onnes otrzymał temperaturę —271,6°.

Badanie własności ciekłego helu dało możność następcy Kamerlingha Onnesa, W. H. Keesomowi i profesorowi Polit. Warsz. Miecz. Wolffkemu ustalenia w 1927 r. ciekawego faktu istnienia dwu różnych stanów ciekłego helu, różniących się gęstością, ciepłem parowania i napięciem powierzchniowem.

Zestalanie cieczy, otrzymanych ze skroplenia t. zw. gazów trwałych, nie nastręczyło szczególnych trudności. Stwierdzono, że ksenon krzepnie w —140° (W. Ramsay, 1903), krypton w —169° (W. Ramsay, 1903), argon w —187,9° (W. Ramsay i M. W. Travers 1901 r.), azot w —210,52° (K. T. Fischer i H. Alt, 1903), tlen w —219 (J. Dewar, 1911 r.), wodór wreszcie w —258,9° pod ciśnieniem 49 mm. rtęci (M. W. Travers i A. Jacquerod, 1903 r.). Jedynie hel przez długi czas stawiał opór wszelkim próbom zestalenia. Przyczyną tego wyjątkowego zachowania się helu było, jak się ostatecznie okazało, nieistnienie w przypadku tego ciała t. zw. punktu potrójnego, to znaczy takiej temperatury i takiego ciśnienia, w których hel stały mógłby być w równowadze termodynamicznej jednocześnie z helem ciekłym i ze swoją parą nasyconą. Wobec tego zwykły sposób zestalania, polegający na oziębianiu cieczy pod ciśnieniem równem ciśnieniu pary nasyconej lub niewiele co większem, nie mógł doprowadzić do celu. Dopiero przez użycie większych ciśnień, jak to w 1924 r. doradzał M. Wolffke, W. H. Keesom otrzymał w 1926 r. hel stały, początkowo w temperaturze —268,88° pod ciśnieniem większem od 140 atm., następnie zaś pod ciśnieniem 26 atmosfer w temperaturze — 271,96°, będącej, jak dotychczas, najniższą temperaturą, otrzymaną kiedykolwiek w laboratorjach.

Rozdział III.

KALORYMETRJA.

„W TEM, co dotyczy ognia, wiedza filozofów jest niewielka. Większość jego własności jest nieznana", pisał na początku XVIII-go stulecia wybitny fizyk holenderski s'Gravesande. Inaczej zresztą być nie mogło. Zjawiska bowiem codzienne, które miały służyć za punkt wyjścia dla doświadczeń laboratoryjnych, były tak złożone, błędne poglądy, oparte na niedokładnych obserwacjach, tak głęboko zakorzenione, że trzeba było dużych wysiłków, aby wyodrębnić niewielką choćby grupę zjawisk prostszych, któreby pozwoliły znaleźć nić przewodnią w tym labiryncie. Nie bez pewnego uzasadnienia można twierdzić, że pierwszy krok na tej drodze zawdzięczamy próbom, dotyczącym zagadnień termometrycznych. Dążenie, o którem była już wyżej mowa, nadania stopniom termometru wyraźniejszych własności fizycznych, ujawniło się, między innemi, w pomyśle powiązania wskazań termometru z wyznaczeniem ciepła, zawartego w danem ciele. Pomysły te, w swej najprostszej postaci, sprowadzały się do wyznaczania temperatury mieszaniny dwu cieczy o niejednakowych początkowych temperaturach. W przypadku zmieszania dwu równych objętości jednej i tej samej cieczy obliczenie tej temperatury nie nastręczało szczególnych trudności; doświadczenie wskazywało, że była ona poprostu średnią arytmetyczną temperatur początkowych. Nawet przy zmieszaniu dwu różnych objętości, a więc, co zatem idzie, i mas danej cieczy, łatwo było wzór poprzedni uogólnić. Wystarczyło założyć, jak to uczynił Richmann (1750 r.), że ciepło, pobrane przez jeden ze składników, oddane zaś przez drugi, jest proporcjonalne do masy danego składnika. Takie bowiem założenie nie przeczyło powszechnie podówczas przyjętemu mniemaniu, że ciepło potrzebne do ogrzania ciała jest zależne od jego objętości. Dopiero zmieszanie przez Fahrenheita za radą słynnego lekarza i fizyka holenderskiego Boerhave'a równych objętości

wody i rtęci dało wyniki nieoczekiwane. Okazało się wtedy, że temperatura ostateczna znacznie odbiega od przeciętnej i że, jak to obliczył Boerhave, należy wziąć dwadzieścia razy większy „ciężar żywego srebra, aby zmierzone działanie siły, wytwarzającej ciepło, było takie samo, jak w przypadku, gdy woda była zmieszana z równą co do ilości (copia) wody". Z tego ważnego doświadczenia Boerhave nie umiał jednak wyciągnąć należytych wniosków. Widział on w tem doświadczeniu dowód „cudownego prawa natury, że ogień rozdziela się między ciała według przestrzeni, nie zaś według gęstości", a więc inaczej, niż to zakładał Newton, pisząc w „Zasadach", że „materja gęstsza... pobiera więcej ciepła". Trzeba było przenikliwie zanalizować cały przebieg doświadczenia, uchwycić i określić te wielkości, które podlegają pomiarowi, aby bezpłodna obserwacja nabrała cech faktu naukowego. Tej wielkiej pracy, na którą dziś z podziwem patrzymy, dokonał Black.

BLACK (Józef) ur. w 1728 r., um. 1791 r., był lekarzem z zawodu. Zajmował katedrę profesorską naprzód w Glasgowie, potem w Edynburgu. Do ważniejszych odkryć Blacka należy odkrycie bezwodnika węglowego. Kapitalnem jego dziełem są „Wykłady chemji" (Lectures on the elements on chemistry), wydane już po jego śmierci. Niżej podane wyjątki wzięte są z tego właśnie dzieła, nie z oryginału jednak, lecz z cytat, jakie podaje E. Mach w swych „Zasadach nauki o cieple" („Principien der Wärmelehre". Wydanie drugie. Lipsk, A. Barth, 1900 r. str. 156 i nast.).

Black zakładał, że wyrównywanie temperatur w mieszaninie prowadzi do stanu, który nazywał „równowagą ciepła. Istoty tej równowagi nie znano dostatecznie, dopóki nie podałem sposobu na należyte jej zbadanie. Boerhave przypuszczał, że tam, gdzieby ona zachodziła, znajdowałaby się jednakowa ilość ciepła w jednakowych miarach przestrzeni, jakiemikolwiek ciałami byłaby przestrzeń ta wypełniona... Muschenbroek też wyrażał swoje mniemanie w podobny sposób: „Est enim ignis aequaliter per omnia, sed admodum magna, distributus, ita ut in pede cubico auri, aeris et plumarum par ignis sit quantitas"[1]. Za podstawę tego mniemania podawano to, że,

[1] „Ogień bowiem jest równo rozdzielony między wszystkie ciała, w miarę ich wielkości, tak, że w stopie sześciennej złota, powietrza i pierzy ilość ognia jest równa".

gdy do któregokolwiek z tych ciał przykładano termometr, ten zawsze pokazywał jednaki stopień. Znaczy to jednak, zbyt pospiesznem spojrzeniem obejmować przedmioty, znaczy to pomieszać ilość ciepła w różnych ciałach z jego ogólnem natężeniem lub wewnętrzną siłą, chociaż jest rzeczą jasną, że są to dwie rzeczy różne, które powinniśmy zawsze odróżniać, gdy chcemy mówić o rozmieszczeniu ciepła. Jeśli np. mamy w jednem naczyniu jeden funt wody i dwa funty w drugiem, i jeżeli te dwie masy są, jak wskazuje termometr, równie ciepłe, to jest rzeczą jasną, że dwa funty muszą mieć podwójną ilość ciepła w stosunku do tej, jaka jest zawarta w jednym funcie...

Zakładano również powszechnie, że ilość ciepła, potrzebna, aby zwiększyć ciepło rozmaitych ciał o tę samą liczbę stopni, jest proporcjonalna do ilości materji, zawartej w każdem z nich, i że, wobec tego, gdy ciała mają równą rozciągłość, ilości ciepła są w stosunku ich gęstości. Wkrótce jednak potem (w 1760 r.) zacząłem nad tą sprawą rozmyślać i spostrzegłem, że pogląd ten jest błędny".

Doświadczenie B o e r h a v e'a wyjaśnia B l a c k w sposób następujący.

„Żeby uczynić wyniki doświadczenia wyraźniejszemi przy pomocy przykładu liczbowego, założymy, że woda ma 100° ciepła, i że równa masa rtęci o 150° będzie z nią nagle zmieszana i wstrząśnięta. Wiemy, że przeciętna temperatura między 100° i 150° jest 125° i że otrzymamy tę przeciętną temperaturę, gdy zmieszamy wodę o 100° z równą ilością wody o 150°, gdyż gorąco ciepłej wody będzie zmniejszone o 25°, gdy zimna woda o tyleż podniesie swą temperaturę.

Jeśli jednak zamiast gorącej wody weźmiemy gorącej rtęci, to temperatura mieszaniny podniesie się tylko do 120° zamiast do 124°. Rtęć stała się dzięki temu o 30° mniej gorąca, woda zaś tylko o 20° gorętsza; a przecież ilość ciepła, którą zyskała woda, jest właśnie tą samą ilością, którą straciła rtęć... To wskazuje, że ta sama ilość materji ciepła wykazuje większą siłę przy ogrzewaniu rtęci, niż równej masy wody. Rtęć przeto ma mniejszą pojemność cieplną dla materji ciepła (że ośmielę się użyć tego wyrażenia), niż woda; wymaga mniejszej ilości ciepła dla podniesienia swej temperatury o tę samą liczbę stopni.

Wniosek, jaki wyciąga B o e r h a v e z tego doświadczenia jest bardzo dziwny. Ze spostrzeżenia, że ciepło nie jest rozdzielone między różne ciała w stosunku do ich ilości, stwierdza on, że jest ono rozdzielone stosownie do przestrzeni, jaką każde ciało zajmuje: wnio-

sek, który przez to właśnie doświadczenie jest obalony. Mimo to Munschenbroeck poszedł za tem jego twierdzeniem.

...Z chwilą, gdy doświadczenie to ujrzałem w tem świetle, o jakiem właśnie mówiłem, znalazłem zadziwiającą zgodność między niem i doświadczeniami, wykonanemi przez Dr. Martina[1]. Znalazł on w kilkakroć powtarzanych doświadczeniach, że rtęć została ogrzana przez ogień znacznie prędzej, niż woda, i prawie dwa razy prędzej... znalazł [też], że rtęć za każdym razem o wiele prędzej się ochładza, niż woda... Zanim te doświadczenie było wykonane, przypuszczano, że rtęć dla ostygnięcia lub ogrzania się tak, jak równa jej masa wody, będzie wymagała dłuższego czasu w stosunku 13 lub 14 do 1. Badania te Dr. Martina... wykazują więc wyraźnie, że rtęć bez względu na swoją wielką gęstość i ciężar wymaga mniej ciepła dla ogrzania, niż to jest konieczne dla podniesienia równej miary równie zimnej wody o tę samą ilość stopni".

Praca Blacka została ogłoszona dopiero po jego śmierci; jest jednak rzeczą niewątpliwą, że poglądy jego i wyniki jego doświadczeń przenikały z sali wykładowej nazewnątrz. Wywarły one bezsprzecznie wpływ na badania szwedzkiego uczonego Wilke'go, i na jego próby ustalenia metod pomiarowych i, co więcej, określenia jednostki ilości ciepła (1772 r.). Punktem wyjścia dla Wilke'go były rozważania Blacka, dotyczące ciepła utajonego topnienia lodu.

„Uważa się zazwyczaj ciecz, jako skutek dodania małej ilości ciepła do tej ilości, która nagrzała ciało mniej więcej do jego temperatury topnienia; powrót zaś takiego ciała do stanu stałego zależałby od bardzo małego zmniejszenia ilości ciepła ciała, gdy zostało na nowo ochłodzone do tego samego punktu... Takie było, o ile mi wiadomo, powszechne zapatrywanie się na tę sprawę, gdy zaczynałem w 1757 r. wykłady w uniwersytecie w Glasgowie... Jeżeli zwrócimy uwagę na sposób, w jaki topnieją lód i śnieg, gdy są poddane powietrzu ciepłego pokoju lub gdy nastąpi po mrozie odwilż, to łatwo będziemy mogli zauważyć, że, jakkolwiek zimne były one z początku, są wkrótce nagrzane do swego punktu topnienia i wkrótce zaczynają przechodzić na swej powierzchni w wodę. Jeżeliby powszechne mniemanie było całkowicie uzasadnione, jeżeliby do całkowitej prze-

---

[1]) Dr. Martin, wymieniony przez Blacka, jest prawdopodobnie tą samą osobą, co George Martine, autor „Essays medical and philosophical" (1740 r.), zawierających ostrą krytykę pomysłów Réaumura.

miany ich w wodę potrzebny był jedynie dalszy dodatek bardzo małej ilości ciepła, to cała masa, choćby znacznych nawet rozmiarów, musiałaby się całkowicie stopić w kilka minut lub sekund, gdyż ciepło jest udzielane nieprzerwanie przez otaczające powietrze. Gdyby tak było istotnie, to z wielu powodów skutki tego byłyby straszliwe; gdyż, nawet tak, jak się rzecz ma obecnie, topnienie wielkich ilości śniegu i lodu wywołuje bystre prądy i powodzie w zimnych krajach"...

Według Blacka można zdać sobie sprawę z ciepła, potrzebnego do stopienia danej masy lodu, w sposób następujący. Umieścimy dwa jednakowe naczynia, z których jedno będzie wypełnione wodą o temperaturze 0^0, drugie zaś lodem o tej samej temperaturze, w pokoju o temperaturze znacznie wyższej. Termometr, umieszczony w naczyniu z wodą, wskaże, o ile stopni podniesie się temperatura wody w ciągu oznaczonego czasu np. 15 minut; zmierzenie czasu, potrzebnego do stopienia w tych samych warunkach, a więc przy tym samym dopływie ciepła, równej masy lodu, pozwoli wyznaczyć stosunek ciepła utajonego topnienia do ciepła, zużytego na ogrzanie wody.

Wilke zmienił nieco pomysł Blacka. Wlewając do danej masy śniegu o temperaturze 0^0 taką samą masę wody o tak dobranej temperaturze, aby woda, ostygając do 0^0, mogła stopić wszystek śnieg, znalazł, że temu warunkowi czyni zadość woda o temperaturze $72^1/_6{}^0$; liczba ta była mniejsza od wyznaczonej przez Blacka metodą wyżej opisaną; Black otrzymał 79,9. Za jednostkę ciepła Wilke przyjmuje to ciepło, które oddaje jednostka ciężaru wody, ostygając o 1^0 C., wobec czego liczba $72^1/_6$ wyraża ilość ciepła, potrzebną do stopienia jednostki ciężaru lodu. To, że Wilke nie tę ostatnią ilość ciepła wziął za jednostkę, innemi słowy, że wybrał jednostkę wodną, nie zaś lodową, wynikało prawdopodobnie stąd, że Wilke pomiarów, wykonanych tą metodą, nie uważał za dokładne i o wiele wyżej stawiał pomiary, wykonane przy pomocy kalorymetru wodnego. W pracy, ogłoszonej w 1781 r., podał, jakim wzorem należy się posługiwać przy tych pomiarach, aby otrzymać wartości „ciepła właściwego" ciał.

Większe o wiele znaczenie od prac Wilke'go miała słynna „rozprawa o cieple" (Mémoire sur la chaleur) Lavoisiera i Laplace'a, odczytana na posiedzeniu Akademji Francuskiej d. 13 czerwca 1783 r. Zawierała ona pierwsze bodaj systematyczne zestawienie ówczesnych poglądów na ciepło i, co ważniejsze, wyniki szeregu ciekawych doświadczeń.

LAVOISIER (Antoine Laurent) ur. w 1743 r. w Paryżu, słusznie jest uważany za jednego z twórców nowoczesnej chemji. Odebrawszy staranne wykształcenie matematyczne, zastosował do badań chemicznych metody nauk ścisłych, co pozwoliło mu dokonać wielu ważnych odkryć, że wymienimy tutaj: obalenie teorji flogistonu oraz wyjaśnienie zjawiska utleniania i wprowadzenie zasady zachowania masy. Do fizyki, w ścisłem znaczeniu tego wyrazu, należy jedynie podana niżej w wyjątkach „rozprawa o cieple". Działalność jego naukowa została przedwcześnie przerwana przez wypadki rewolucji francuskiej. Stanowisko generalnego poborcy podatków, które zajmował w 1771 r., uczyniło go w oczach tłumu, pamiętającego różne nadużycia tych poborców, podejrzanym i wreszcie zaprowadziło na gilotynę 8 maja 1794 roku.

Drugi ze współautorów „Rozprawy o cieple" LAPLACE (Pierre Simon hr. de L.), urodzony w 1749 r., pracował w zupełnie innej, niż Lavoisier dziedzinie. Tytułu do sławy dostarczyły mu znakomite prace matematyczne i astronomiczne; rozwinięcie Newtonowskiej teorji ciążenia powszechnego dało mu możność wyliczenia zakłóceń biegu planet, wykazania, że oś wielka orbity zakłóconej nie ulega zmianom wiekowym, a wreszcie doprowadziły go do postawienia słynnej hipotezy kosmogonicznej, znanej obecnie pod nazwą hipotezy Kanta i Laplace'a, która do dziś dnia w zastosowaniu do naszego układu planetarnego nie straciła na wartości. Laplace był członkiem komisji, zwołanej w celu wypracowania nowych wzorów miar i wag. Wynikiem prac tej komisji było, jak wiadomo, przyjęcie metra za jednostkę długości i kilograma za jednostkę masy. Obdarzony dużą zdolnością przystosowywania się do zmiennych warunków politycznych przetrwał szczęśliwie burzę rewolucyjną i pod panowaniem Napoleona I, który nadał mu tytuł hrabiowski, doszedł do wielkich godności. Umarł w 1827 r. w Paryżu. Głównemi jego dziełami są „Mécanique céleste" w 5 tomach i „Théorie analytique des probabilités".

Rozprawa o cieple [1]).

„Fizycy nie są jednomyślni co do istoty ciepła. Wielu z nich uważa je za płyn, który jest rozpowszechniony w całej przyrodzie i który mniej lub więcej przenika ciała, stosownie do stopnia ich tempera-

[1]) Tłumaczone z przedruku w wydawnictwie „Les maîtres de la pensée scientifique". Paris. Gauthier-Villars, 1920.

tury i właściwej im zdolności zatrzymywania ciepła; może się on łączyć z ciałami i wtedy przestaje działać na termometr i przechodzić z jednego ciała do drugiego; jedynie w stanie swobody, pozwalającej płynowi temu dojść w ciałach do równowagi, stanowi on to, co nazywamy „ciepłem swobodnem". Inni fizycy sądzą, że ciepło nie jest niczem innem, jak tylko skutkiem niedostrzegalnych ruchów drobin materji. Wiadomo, że ciała, nawet najgęstsze, są wypełnione wielką ilością por czyli małych próżni, których objętość może znacznie przewyższać objętość zawierającej je materji; te puste przestrzenie dozwalają cząstkom drgać swobodnie w rozmaitych kierunkach, i to naprowadza na myśl, że cząstki te znajdują się w ustawicznym ruchu, który, wzrastając do oznaczonej granicy, może nawet rozłączać małe cząstki i tym sposobem rozkładać ciała; ten ruch wewnętrzny jest, według poglądów fizyków, o których mówimy, tem, co stanowi ciepło.

Dla rozwinięcia tej hipotezy zwróćmy przedewszystkiem uwagę, że przy wszystkich ruchach, w których nie zachodzą nagłe zmiany, obowiązuje ogólne prawo, któremu geometrzy nadali nazwę „prawa zachowania siły żywej". Prawo to głosi, że w układzie ciał, które działają na siebie wzajemnie w sposób jakikolwiek, siła żywa, t. j. suma iloczynów oddzielnych mas przez kwadrat prędkości jest stała. Gdy ciała podlegają siłom przyspieszającym, siła żywa równa jest sile żywej, która była na początku ruchu, więcej suma mas pomnożonych przez kwadrat prędkości, wywołanych przez działanie sił przyśpieszających. W hipotezie, którą rozpatrujemy, ciepło jest siłą żywą, wynikającą z niedostrzegalnych ruchów drobin ciała. Jest ono sumą iloczynów z mas poszczególnych drobin przez kwadrat ich prędkości.

Jeżeli zetkniemy dwa ciała, których temperatura jest różna, to ilości ruchu, których sobie wzajemnie udzielą, będą początkowo nierówne; siła żywa ciała zimniejszego będzie wzrastała o tę samą ilość, o którą zmniejsza się siła żywa drugiego ciała, i przyrost ten będzie zachodził dopóty, dopóki ilości ruchu, które przechodzą z jednego ciała na drugie, nie będą wzajemnie równe; wtedy temperatura ciał będzie wyrównana.

— — — — — — — — — — — — — — — —

Nie chcemy rozstrzygać między dwiema wyżej przytoczonemi hipotezami; wiele zjawisk przemawia na korzyść ostatniej hipotezy: np. to, że ciepło powstaje przez tarcie dwu ciał stałych; ale są inne, które łatwiej objaśnić na zasadzie pierwszej hipotezy; być

może, że obiedwie są jednocześnie słuszne. W każdym razie, ponieważ co do istoty ciepła można postawić tylko te dwie hipotezy, więc należy przyjąć zasady, wspólne dla nich obu; otóż zarówno według jednej, jak i drugiej, swobodna ilość ciepła pozostaje zawsze ta sama, gdy zachodzi zwyczajne mieszanie ciał. To jest oczywiste, jeżeli ciepło jest płynem, który dąży do stanu równowagi, jeżeli zaś jest siłą żywą wewnętrznych ruchów materji, wówczas zasada, o którą chodzi, jest wnioskiem z prawa zachowania siły żywej. Zachowanie ciepła swobodnego przy zwyczajnem mieszaniu ciał jest więc niezależne od wszelkiej hipotezy co do istoty ciepła; jest ono ogólnie przyjęte przez fizyków, i my również przyjmiemy je w dalszych badaniach.

Jeżeli ciepło jest płynem, to jest rzeczą możliwą, że, przy połączeniu się kilku ciał, łączy się ono z niemi lub się z nich wydziela; niema więc a priori żadnej podstawy, żeby ciepło swobodne było takiem samem przed i po połączeniu; również hipoteza, że ciepło jest siłą żywą drobin, nic pod tym względem nie mówi; substancje bowiem łączące się działają na siebie stosownie do stopnia wzajemnego powinowactwa, drobiny ich podlegają przeto siłom przyciągania, które mogą zmienić ilość siły żywej, a co zatem idzie — i ciepła; można jednak przyjąć następującą zasadę, która jest wspólna obydwu hipotezom.

Jeżeli przy połączeniu się lub jakiejkolwiek zmianie stanu zachodzi zmniejszenie się ciepła swobodnego, ciepło to znowu zjawi się całkowicie, gdy ciała powrócą do swego stanu poprzedniego i odwrotnie, jeżeli przy połączeniu się lub zmianie stanu zajdzie przyrost ciepła swobodnego, nowe to ciepło zniknie przy powrocie substancyj do ich stanu początkowego[1]).

Zasada ta jest zresztą potwierdzona przez doświadczenia... Można ją jednak wyrazić jeszcze ogólniej i rozszerzyć na wszystkie zjawiska cieplne w sposób następujący: Wszystkie zmiany cieplne czy też istotne, czy też pozorne, które zachodzą w układzie ciał, zmieniających swój stan, powtarzają się w odwrotnym porządku,

---

[1]) To twierdzenie Lavoisiera i Laplace'a jest słuszne tylko w tym przypadku, gdy suma algebraiczna prac wykonanych przez układ jest równa zeru.

g d y u k ł a d w r a c a d o s w e g o s t a n u p o c z ą t k o w e g o [1]). Tak np. zamiana lodu w wodę i wody w parę wywołuje bardzo znaczne znikanie ciepła, mierzonego termometrem, ciepło to zjawia się na nowo przy zamianie wody w lód lub przy zgęszczaniu pary w wodę. Naogół można sprowadzić pierwszą hipotezę do drugiej, gdy się w niej zamieni słowa „ciepło swobodne, ciepło związane, ciepło uwolnione" na słowa „siła żywa, strata siły żywej, przyrost siły żywej".

— — — — — — — — — — — — — — — — —

Jeżeli przypuścimy, że mamy dwa ciała o równej masie, sprowadzone do tej samej temperatury, to ilość ciepła, potrzebna do podniesienia ich temperatury o 1^0, może nie być ta sama dla obydwu ciał; i gdy przyjmiemy za jednostkę tę ilość ciepła, która może podnieść o 1^0 temperaturę jednego funta zwykłej wody, to staje się łatwo zrozumiałem, że wszystkie inne ilości ciepła, odnoszące się do rozmaitych ciał, mogą być wyrażone w częściach tej jednostki. Ten stosunek ilości ciepła, które są potrzebne do podniesienia temperatury przy równych masach o jednakową ilość stopni, będziemy nadal rozumieli jako pojemność cieplną lub ciepło właściwe. Stosunek ten może się zmieniać w różnych stopniach temperatury... Możemy jednak założyć, że stosunek ten jest mniej więcej stały od 0^0 do 80^0; nam przynajmniej doświadczenie nie pozwoliło zauważyć jakiejś wyraźniejszej różnicy; będziemy wyznaczali ciepło właściwe rozmaitych substancyj wewnątrz tych granic.

Do wyznaczenia tych ilości używana jest następująca metoda. Wyobraźmy sobie 1 funt rtęci o 0^0 i 1 funt wody o 34^0; gdy zmieszamy obiedwie [ciecze], ciepło wody udziela się rtęci i po pewnej chwili mieszanina przybiera temperaturę jednostajną. Załóżmy, że równa się ona 33^0 i że naogół przy mieszaniu kilku substancyj, które nie działają na siebie chemicznie, ilość ciepła pozostaje zawsze ta sama; przy tych założeniach stopień ciepła, który straciła woda, podnosi temperaturę rtęci o 33^0; stąd wynika, że dla ogrzania rtęci do danej temperatury, potrzebna jest tylko 33-cia część tego ciepła, które doprowadza do tej temperatury wodę, to znaczy, że ciepło właściwe rtęci jest 33 razy mniejsze, niż ciepło właściwe wody.

[Dalej następuje wyprowadzenie znanego wzoru kalorymetrycznego na wyznaczenie ciepła właściwego].

---

[1]) O ile przemiana jest odwracalna.

W praktyce ta metoda [mieszanin] posiada liczne niedogodności, które mogą spowodować w wynikach znaczne błędy... Metody tej nie można również stosować do wyznaczenia zimna lub ciepła, które jest wytwarzane przez związki, i jest ona zupełnie nieodpowiednia do wyznaczenia ciepła, wywiązanego przy spalaniu i oddychaniu. Ponieważ badanie tych zjawisk jest najciekawszą częścią teorji ciepła, uważaliśmy, że bardzo pożyteczną dla tej teorji byłaby metoda, nadająca się do ścisłego wyznaczenia tego ciepła, gdyż bez niej o przyczynie powstawania ciepła możnaby stawiać jedynie hipotezy, których zgodności z doświadczeniem nie moglibyśmy sprawdzić... Jeżeli masę lodu, oziębionego do dowolnego stopnia, umieścimy w atmosferze, której temperatura jest wyższa od punktu zerowego termometru, to wszystkie części masy lodowej będą podlegały wpływowi ciepła atmosfery dopóty, dopóki temperatura masy nie dojdzie do zera. Wtedy ciepło atmosfery będzie zatrzymywane na powierzchni lodu, nie mogąc przedostać się do środka; będzie ono użyte wyłącznie na stopienie pierwszej warstwy lodu, która będzie je pochłaniała, roztapiając się na wodę; termometr, pogrążony w tę warstwę, utrzyma się na tym samym stopniu, i jedynem widzialnem działaniem ciepła będzie zamiana lodu w ciecz. Jeżeli wtedy lód otrzyma nowy stopień ciepła, roztopi się nowa warstwa i tym sposobem pochłonie wszystko ciepło, które jej zostało udzielone; wskutek tego ciągłego topnienia lodu będą się powoli wydostawały na powierzchnię wszystkie wewnętrzne punkty masy i jedynie w tem położeniu będą znowu poddawane działaniu ciepła ciał otaczających.

Wystawmy sobie teraz w atmosferze, której temperatura jest wyższa od 0°, wydrążoną kulę lodową o temperaturze 0° i wewnątrz niej ciało, ogrzane do jakiegokolwiekbądź stopnia; z tego, cośmy powiedzieli, wynika, że ciepło zewnętrzne nie może przedostać się do wydrążenia kuli, i że ciepło ciała nie może się rozproszyć nazewnątrz, lecz pozostaje ograniczonem do wewnętrznej powierzchni wydrążenia, na której może stapiać ciągle nowe warstwy dopóty, dopóki temperatura tego ciała nie spadnie do 0°; niema obawy, aby topnienie wewnętrznego lodu zależało od innych przyczyn, niż ciepło, utracone przez ciało, gdyż lód ten jest zabezpieczony przed wpływem każdego innego ciepła grubością lodu, który go oddziela od atmosfery; z tych samych powodów można być pewnym, że całe ciepło ciała, uchodząc z niego, jest zatrzymywane przez lód wewnętrzny i zostaje wyłącznie użyte na stopienie go. Stąd wynika, że, jeżeli się starannie zbierze wodę, zamkniętą w wydrążeniu kuli, gdy tempera-

tura ciała spadnie do 0°, ciężar jej będzie dokładnie proporcjonalny do ciepła, które to ciało straciło, ochładzając się od swej temperatury początkowej do temperatury topniejącego lodu; gdyż jest rzeczą jasną, że dwa razy większa ilość ciepła musi stopić dwa razy



Rys. 61.

więcej lodu; tym sposobem ilość stopionego lodu jest dokładną miarą ciepła, które wywarło to działanie.

[Dalej autorzy opisują nowy typ kalorymetru lodowego, składającego się z wewnętrznej siatki metalowej, do której wrzucane jest badane ciało, z naczynia, w którem ta siatka jest zanurzona i które wypełnione jest drobno tłuczonym lodem, i płaszcza ochronnego też wypełnionego lodem] (rys. 61).

ARTYKUŁ II.

Doświadczenia nad ciepłem, wykonane opisaną metodą.

Odnosimy ciepło właściwe wszystkich ciał do zwykłej wody, jako jednostki; jako przeciętną wielu doświadczeń, prawie zgodnych ze sobą, znaleźliśmy, że ciepło potrzebne do stopienia 1 funta lodu, mogłoby 1 funt wody ogrzać do 60°; tym sposobem, gdy się zmiesza 1 funt lodu o 0° i funt wody o 60°, otrzymuje się w rezultacie 2 funty wody o 0°; stąd wynika, że lód, gdy się staje ciekłym, pochłania 60° ciepła, co można wyrazić w sposób następujący, niezależnie od dowolnych podziałów ciężarów i termometru: *ciepło potrzebne dla stopienia lodu równe jest ³/₄ tego ciepła, które może ogrzać równy ciężar wody od temperatury topniejącego lodu do temperatury wody wrzącej.*

— — — — — — — — — — — — — — — — —

ARTYKUŁ III.

Sprawdzenie poprzednich doświadczeń i rozważania, dotyczące teorji ciepła.

— — — — — — — — — — — — — — — — —

Lód, zamieniający się w wodę, pochłania, jak mówiliśmy w poprzedzającym artykule, 60 stopni ciepła; ta własność pochłaniania ciepła przy przechodzeniu w stan ciekły jest właściwa nie tylko temu jednemu ciału; można się przekonać, że wogóle przy przechodzeniu wszelkich ciał w stan ciekły zachodzi pochłanianie ciepła; gdyż, jeżeliby przy tem przechodzeniu ciało wytwarzało ciepło, to należałoby mu je odjąć, aby je uczynić ciekłem; stawałoby się wtedy stałem dzięki ciepłu, ciekłem dzięki zimnu, co sprzeciwia się temu, czego nas uczy o topieniu się ciał doświadczenie. Taki przypadek, że przy przejściu w stan ciekły nie zachodzi ani wytwarzanie ani pochłanianie ciepła jest, co prawda, matematycznie możliwy, ale niesłychanie mało prawdopodobny; należy go uważać za graniczną wartość ilości ciepła pochłoniętej przy tem przechodzeniu. Dzięki temu możemy się wznieść do zasady o wiele ogólniejszej, obejmującej wszystkie zjawiska, wywołane przez ciepło: *przy zmianach, które ciepło wywołuje w stanie układu ciał, zachodzi zawsze pochłanianie ciepła w ten spo-*

sób, że stan, który wynika bezpośrednio z innego dzięki dostatecznemu przypływowi ciepła, pochłania ciepło, przyczem stopień temperatury układu nie podnosi się, np. przy przejściu wody w parę stale będzie pochłaniane ciepło, i termometr, który pogrążymy w wodzie wrzącej lub w parze, wydostającej się z niej, ciągle stać będzie na tym samym stopniu; to samo musi zachodzić przy wszystkich rozkładach, powstających jedynie pod działaniem ciepła, i, jeżeli przy niektórych z nich wytwarza się ciepło, należy to wytwarzanie się ciepła przypisać szczególnym przyczynom".

Typ kalorymetru, opracowany przez Lavoisiera i Laplace'a w pierwotnej swej postaci nie nadawał się do ścisłych pomiarów; dopiero Bunsen (1870 r.) przekształcił go w sposób, czyniący zadość wymaganiom większej dokładności, przez zastąpienie pomiaru masy stopionego lodu pomiarem zmniejszania się objętości, które zachodzi, gdy lód zamienia się w wodę. Na zbliżonych zasadach oparli znacznie później (1906 r.) Forch i Nordmayer pomysł kalorymetru, w którym ilość ciepła, doprowadzonego do powoli wrzącej cieczy, znajdującej się pod zmniejszonem ciśnieniem, mierzymy ilością wydobywającej się pary; analogiczne cechy posiada również metoda, użyta (1887 r.) przez Bunsena i Jolly'ego, gdzie ciepło, wywiązywane przy skraplaniu się pary, ogrzewa ciało, którego ciepło właściwe mierzymy.

Te metody, któreby można nazwać izotermicznemi z uwagi na to, że ciało kalorymetryczne zachowuje w ciągu całego pomiaru temperaturę niezmienną, nie pozostały jedynemi. Można nawet powiedzieć, że stanowiły one wyjątek w porównaniu z zastosowaniami metody kalorymetru wodnego, którą wprowadził, jak wyżej o tem była mowa, Wilke. Zarzut, stawiany tej metodzie przez Lavoisiera i Laplace'a, że, używając jej,

„należy uwzględnić ciepło, pochłonięte przez naczynia i atmosferę w ciągu czasu, podczas którego temperatura mieszaniny dochodzi do jednostajności, co wymaga rachunku delikatnego i podlegającego błędom",

został częściowo obalony przez Regnaulta, który, biorąc za podstawę Newtonowskie prawo ostygania, rachunek ten wykonał i wyniki jego podał w postaci odpowiedniego wzoru.

Błędy, związane z pochłanianiem ciepła przez termometr, zanu-

rzony w kalorymetrze, próbowali usunąć (1852 r.) Favre i Silbermann w ten sposób, że rozszerzająca się przy ogrzewaniu ciecz kalorymetryczna była jednocześnie cieczą termometryczną. W bardziej radykalny sposób usuwa niedogodności zwykłego kalorymetru wodnego, t. zw. kalorymetr adjabatyczny, zbudowany przez Atwatera i Rosa (1899 r.), a później wielekroć udoskonalany (między innemi przez profesora Politechniki Warszawskiej, Wojciecha Świętosławskiego). W kalorymetrze adjabatycznym temperatura płaszcza ochronnego, jakim jest otoczony właściwy kalorymetr, jest stale utrzymywana na tej wysokości, co temperatura cieczy kalorymetrycznej. Nieco inaczej trudnościom, wynikającym z ostygania kalorymetru podczas pomiaru, próbują zaradzić, t. zw. kalorymetry różnicowe, składające się z dwu możliwie jednakowych naczyń kalorymetrycznych, z których jedno jest ogrzewane przez badaną ilość ciepła, drugie zaś przez tak dobraną ilość ciepła, aby temperatury obydwu naczyń pozostały równe. Takiego kalorymetru użył do pomiarów w 1901 r. Steinwehr; odmienny typ, o wielkiej czułości i bardzo małej pojemności cieplnej zbudował (1920 r.) Ludwik Wertenstein, profesor Wolnej Wszechnicy Polskiej.

Wzrastająca dokładność pomiarów cieplnych nie wywołała jednak zasadniczej zmiany w wyborze jednostki ilości ciepła. Przyjętą dzisiaj powszechnie nazwę nazwę kalorji nadali jej wymienieni już wyżej Favre i Silbermann (1852 r.).

„Powtarzamy, że jednostka, którąśmy przyjęli, jest jednostką, przyjętą przez wszystkich fizyków, to znaczy, ilością ciepła, potrzebną do podniesienia 1 g. wody o 1 stopień i nazywaną jednostką ciepła lub kalorją".

Należy zaznaczyć, że twierdzenie o „wszystkich fizykach" mogło wówczas dotyczyć jedynie Francji; w innych krajach, gdzie obowiązywały inne układy miar i wag, określenia jednostki ciepła były inne; to też nazwa kalorji bardzo powoli się rozpowszechniała: w dwadzieścia przeszło lat po ukazaniu się pracy Favre'a i Silbermanna niemieccy fizycy jeszcze nazwy tej nie używali; w Anglji przyjęto ją jeszcze później. Z biegiem czasu, gdy doświadczenia Rowlanda (1878 r.) udowodniły zależność ciepła właściwego wody od temperatury, trzeba było nieco zmienić określenie kalorji. Obecnie, za inicjatywą Warburga, kalorją nazywamy ilość ciepła, potrzebną do ogrzania wody o temperaturze 15° skali normalnej o jeden stopień (od 14,5 do 15,5).

Rozdział IV.

ZASADY TERMODYNAMIKI.

BYŁOBY zmniejszaniem znaczenia „Rozprawy o cieple“ Lavoisiera i Laplace'a, gdybyśmy widzieli w niej jedynie pierwszą pracę z dziedziny kalorymetrji. Sam pomiar ilości ciepła był zarówno dla Lavoisiera, jak i Laplace'a zagadnieniem pomocniczem, potrzebnem do otrzymania odpowiedzi na inne ważniejsze, według nich, pytania. Jakie jest ciepło właściwe różnych ciał, jak duża ilość ciepła wywiązuje się przy spalaniu, jakim prawom podlega ciepło, pochłaniane lub uwalniane przy zmianie stanu skupienia ciał — oto zagadnienia, postawione w „Rozprawie“ i, należy przyznać, częściowo przynajmniej rozstrzygnięte. Trzeba było czekać długie lata na pojawienie się w tej dziedzinie fizyki prac o równem znaczeniu naukowem. Nie wcześniej, niż w 60 lat od chwili ukazania się „Rozprawy“, po ułamkowych badaniach Davy'ego (1812 r.), Despretza (1824 r.), Dulonga (1838 r.), podejmuje Hess rozpoczęte przez Lavoisiera i Laplace'a badania ciepła reakcji, stwarzając w ten sposób nową dziedzinę badań — termochemję; w 40 lat dopiero po Lavoisierze i Laplace'u ukazuje się praca, ujmująca zjawiska cieplne głębiej i wszechstronniej, niż „Rozprawa o cieple“. Autorem jej był Sadi-Carnot.

Pierwsze próby sformułowania t. zw. drugiej zasady termodynamiki. — Twierdzenie Carnota. — SADI - CARNOT (Nicolas Leonard), syn wielkiego ministra wojny z czasów Rewolucji Francuskiej, Łazarza Carnota, urodził się w 1796 r. w Paryżu. Studja wyższe odbywał w szkole politechnicznej, po której ukończeniu wstąpił do sztabu generalnego. W 1828 r. wystąpił z wojska. Epidemja cholery, grasująca we Francji w 1832 r. nie ominęła Sadi-Carnota; umarł po kilkugodzinnych cierpieniach, zostawiając po sobie broszurę, wydaną w 1824 r. p. t. „Uwagi o potędze poruszającej ognia

i o maszynach zdolnych do wytwarzania tej potęgi"[1]), oraz nieuporządkowane notatki, ogłoszone dopiero w 1878 r.

„Wiemy wszyscy, tak zaczyna swe „Uwagi" Carnot, że ciepło może być przyczyną ruchu, że posiada nawet wielką potęgę poruszającą... Ciepłu musimy przypisać wszelkie ruchy, które uderzają nasz wzrok na ziemi, ciepłu zawdzięczamy zaburzenia atmosfery, wznoszenie się obłoków, spadanie deszczu i innych opadów; prądy wody, przerzynające powierzchnię kuli ziemskiej, których drobną zaledwie cząstkę udało się człowiekowi na swój obrócić użytek, wreszcie trzęsienia ziemi, wybuchy wulkanów przyczynę swoją mają również w cieple. Z tego olbrzymiego zbiornika możemy czerpać siłę poruszającą, niezbędną dla naszych potrzeb; przyroda, zewsząd nam dostarczając materjałów palnych, dała nam możność wzbudzenia w każdym czasie i na każdem miejscu ciepła i potęgi poruszającej, która z niego wynika. Wytworzyć tę potęgę, przystosować ją do naszych potrzeb, taki jest cel maszyn ogniowych.

Badanie tych maszyn jest niesłychanie ciekawe, znaczenie ich jest olbrzymie, stosowanie ich z każdym dniem rośnie".

Mimo jednak „prac wszelkiego rodzaju, dotyczących maszyn ogniowych, mimo zadawalającego stanu, do jakiego dziś one doszły, teorja ich jest mało opracowana i próby ich udoskonalenia ciągle jeszcze są zdane prawie na los przypadku".

Wynika to stąd, że „zjawisko wytwarzania przez ciepło ruchu nie było rozważane z dostatecznie ogólnego punktu widzenia. Rozpatrywano je tylko w maszynach, których istota i sposób działania nie pozwalały mu się okazać w całej rozciągłości, do jakiej są zdolne. W podobnych maszynach zjawisko jest do pewnego stopnia ucięte, niezupełne; trudną wtedy staje się rzeczą poznanie jego zasad i zbadanie jego praw... Dla rozpatrzenia w całej ogólności zasady wytwarzania przez ciepło ruchu trzeba je rozważać niezależnie od jekiegokolwiek mechanizmu, jakiegokolwiek szczególnego czynnika; trzeba ustalić rozumowania, któreby mogły być stosowane nietylko do maszyn parowych, ale do każdej maszyny, jaką so-

---

[1]) „Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance". Par Sadi Carnot, ancien élève de l'Ecole politechnique. A Paris, chez Bachelier, libraire, Quai des Augustins Nr. 55, 1824. — Wszystkie cytaty w tekście są wzięte z wydanego w 1903 r. przez Librairie Scientifique A. Hermann, Paris, rue de la Sorbonne 6, przedruku, odtwarzającego wiernie wydanie pierwotne.

bie można wyobrazić, jakąkolwiek byłaby użyta substancja i jakimkolwiek byłby sposób, w jaki się na nią działa".

Wzór takiego rozumowania jest gotów: daje go mechanika, w której „wszystkie przypadki są przewidziane, wszystkie możliwe ruchy poddane zasadom ogólnym, gruntownie ustalonym i mającym zastosowanie we wszelkich okolicznościach. To właśnie stanowi cechę teorji zupełnej".

Cel badań jest tedy wyraźnie oznaczony, metoda — jasno wskazana. Nie sprowadzenie do zasad mechaniki, lecz ujęcie zjawisk cieplnych we wzory, równie ścisłe, równie ogólne, jak wzory Lagrange'a — „to bowiem stanowi cechę teorji zupełnej". To samo mniej więcej powtórzy w trzydzieści jeden lat później Rankine w swych słynnych „Zarysach nauki o energetyce" (Outlines of the Science of Energetics), to stanie się na długie lata wytyczną badań wielu fizyków.

A więc, podobnie, jak w mechanice, gdzie punktem wyjścia jest wyznaczenie warunków ogólnych, jakie towarzyszą ruchowi, i tutaj należy rozpocząć od ustalenia zasady ogólnej, towarzyszącej powstawaniu „potęgi poruszającej" w „maszynach ogniowych". Cechą tą, według Carnota, jest to, co nazywa przywróceniem równowagi w cieplíku, „przejście jego od ciała mniej lub więcej ogrzanego do ciała zimniejszego". Stwierdzenie tej cechy jest dla Carnota rzeczą wielkiej wagi, gdyż jakkolwiek uważa ją „za fakt sam przez się oczywisty", wyjaśnia ją i rozpatruje na sześciu przeszło stronicach, dając wreszcie takie jej ostateczne sformułowanie:

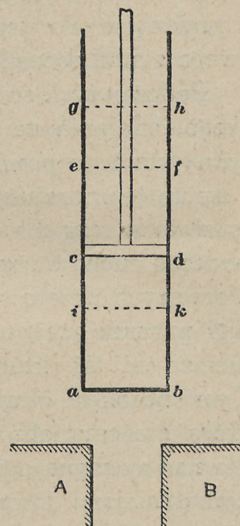
„Wszędzie, gdzie istnieje różnica temperatur, może zajść wytwarzanie potęgi poruszającej. Odwrotnie, wszędzie, gdzie można zużyć tę potęgę, jest rzeczą możliwą wytworzyć różnicę temperatur".

Carnot nie próbuje udowodnić tego twierdzenia, jest ono dla niego faktem doświadczalnym, jest „zasadą". Z zasady tej wynika bezpośrednio inna, mniej ogólna niewątpliwie, lecz za to o dużem znaczeniu praktycznem. Skoro „wszelkie przywrócenie równowagi w cieplíku może być przyczyną wytworzenia potęgi poruszającej, [to] każde przywrócenie równowagi, które zajdzie bez wytworzenia tej potęgi, musimy uważać za istotną stratę".

Z chwilą więc, gdy chcemy, aby w danej maszynie „ogniowej" przywróceniu równowagi w cieplíku towarzyszyło powstanie możliwie największej „potęgi poruszającej", musimy tak przeprowadzić doświadczenie, „aby w ciałach, użytych do urzeczywistnienia potęgi po-

ruszającej ciepła nie zachodziła żadna zmiana temperatury, któraby nie była wywołana zmianą objętości".

Tym warunkom zadosyć czyni następujące urządzenie. Niech dwa ciała *A* i *B*, z których pierwsze ma temperaturę wyższą, niż drugie, będą nieograniczonemi zbiornikami ciepła; ciepło to jest przenoszone od ciała *A* (ogniska) do ciała *B* (chłodnicy) przez ciało trzecie (np. parę lub gaz). To trzecie ciało, które nazwiemy, odstępując tym razem od terminologji Carnota, ciałem czynnem, a którem u Carnota jest powietrze, znajduje się w naczyniu cylindrycznem; zaopatrzonem w tłok ruchomy. Przypuśćmy, że początkowa temperatura ogniska jest równa temperaturze ciała czynnego[1]); wprowadzamy te dwa ciała w zetknięcie i dopuszczamy do zwiększania się objętości ciała czynnego, pozostawiając je ciągle w zetknięciu z ogniskiem. Podczas tej przemiany pewna ilość cieplika przechodzi z ogniska do ciała czynnego; cieplik ten Carnot nazywa cieplikiem objętości, rozumiejąc przez to ilość ciepła potrzebną do utrzymania ciała mimo zmiany objętości w stałej temperaturze. Bez dopływu tego ciepła każdy płyn gazowy obniżyłby przy rozprężaniu swoją temperaturę. Jest to dla Carnota „jeden z faktów najlepiej potwierdzonych przez doświadczenie[2])".



Rys. 62.

W ciągu tej przemiany siła sprężysta płynu działa na tłok i powoduje powstanie „potęgi poruszającej". Następnie oddalamy ciało czynne od ogniska i dopuszczamy do dalszego zwiększania jego objętości; ciało to, nie stykając się podczas tej przemiany z żadnem innem ciałem, mogącem mu dostarczyć ciepła, oziębia się tem bardziej, im bardziej zwiększa się jego objętość. W ten sposób możemy temperaturę ciała czynnego zrównać z temperaturą chłodnicy. Tej przemianie, związanej, jak i poprzednio, ze zwiększeniem objętości, towarzyszy również wytwarzanie „potęgi poruszającej".

---

[1]) A właściwie nieskończenie mało od niej wyższa.

[2]) Istotnie mógł Carnot powołać się dla uzasadnienia swego poglądu na cały szereg doświadczeń, że wymienimy tylko doświadczenia Darwina (1788 r.), Daltona (1802 r.) i Gay-Lussaca, zgodnie stwierdzające, że powietrze przy rozprężaniu oziębia się, przy zgęszczaniu ogrzewa.

Z chwilą, gdy ciało czynne przybierze temperaturę chłodnicy, stykamy je z nią i zmniejszamy jego objętość. Będzie to wymagało zużycia pewnej ilości „potęgi poruszającej" i oddania pewnej ilości cieplika chłodnicy. Wreszcie, oddalając ciało czynne od chłodnicy i zmniejszając jego objętość, możemy podnieść jego temperaturę z powrotem do temperatury ogniska. Ciało czynne wróci więc do swego stanu początkowego [1].

„Podczas tych różnych czynności tłok doznaje mniejszego lub większego działania ze strony powietrza, zamkniętego w cylindrze; siła sprężysta tego powietrza zmienia się zarówno wskutek objętości, jak i zmian temperatury; należy jednak zauważyć, że dla równych objętości, to znaczy dla podobnych położeń tłoka, temperatura jest wyższa podczas ruchów rozszerzania, niż podczas ruchów ściskania. Podczas pierwszych przeto siła sprężysta jest większa, i wobec tego ilość potęgi poruszającej, wytworzonej przez ruchy rozszerzania jest znaczniejsza od tej, którą zużyliśmy na wytworzenie ruchów ściskania. Tym sposobem otrzymamy nadwyżkę potęgi poruszającej, nadwyżkę, którą możemy obrócić na jakikolwiek użytek. Powietrze było więc dla nas maszyną ogniową; użyliśmy go nawet w sposób możliwie najkorzystniejszy, gdyż nie zaszło żadne nieużyteczne przywrócenie równowagi w cieplikú".

„[To] wytwarzanie potęgi poruszającej zawdzięczamy jednak nie rzeczywistemu zużyciu cieplika, lecz przeniesieniu go z ciała gorącego do ciała zimnego", cieplik przeto pobrany z ogniska jest całkowicie oddany chłodnicy.

„Wszystkie wyżej opisane działania mogą być wykonane w kierunku i porządku odwrotnym".

Ciało czynne o temperaturze ogniska zamiast powiększać swą objętość w zetknięciu z ogniskiem, będzie się rozprężało w odosobnieniu cieplnem, wskutek czego oziębi się do temperatury chłodnicy, następnie w zetknięciu z nią będzie dalej zwiększało swoją objętość, zachowując temperaturę niezmienną i pobierając od niej cieplik; poczynając od pewnego momentu, będzie odsunięte od chłodnicy i poddane zgęszczeniu, które spowoduje wzrost jego temperatury aż do temperatury ogniska; dalsze zgęszczanie w temperaturze ogniska doprowadzi ciało do stanu początkowego.

---

[1]) Carnot nigdzie wyraźnie nie uzasadnia konieczności rozpatrywania zamkniętego cyklu przemian, tak, że możemy się tylko domyślać powodów, jakie go do tego skłoniły. W pierwszym rzędzie odegrało tu rolę uważanie cieplika za funkcję stanu ciała (p. niżej pracę Clausiusa).

„Wynikiem pierwszych działań było wytworzenie pewnej ilości potęgi poruszającej i przeniesienie cieplika z ciała *A* do ciała *B*; wynikiem działań odwrotnych jest zużycie potęgi poruszającej i powrotne przejście cieplika z ciała *B* do ciała *A*".

Tak, że jeżeli zmiany objętości w obydwu cyklach przemian były dokładnie równe co do wartości bezwzględnej, „dwa te szeregi działań znoszą się wzajemnie, w pewien sposób się zobojętniają".

Ilość bowiem cieplika, zawartą w ciele czynnem, Carnot uważa za funkcje stanu fizycznego ciała: „zakładamy milcząco w doświadczeniu naszem, że, gdy ciało doznało jakichkolwiek zmian i po pewnej ilości przemian wróciło identycznie do swego stanu pierwotnego, to znaczy do tego stanu, rozważanego pod względem gęstości, temperatury i stanu skupienia, zakładamy powiadam, że ciało to będzie zawierało tę samą ilość cieplika, co poprzednio".

Wobec tego chłodnica odda ognisku w przemianie odwrotnej tę samą ilość cieplika, którą uprzednio pobrała.

Do wyznaczenia więc warunków, w jakich przeniesieniu przez dane ciało czynne oznaczonej ilości cieplika towarzyszyć będzie wytworzenie możliwie największej „potęgi poruszającej", wystarcza całkowicie zasada, ustalona przez Carnota, a raczej wypływające z niej bezpośrednio dwa wnioski: jeden, który Carnot formułuje wyraźnie i wyrażający się w warunku, aby nigdzie nie zachodziło „przywrócenie równowagi w cieplíku" bez wytwarzania „potęgi poruszającej", i drugi, zawarty implicite w założeniu równoważności przemiany odwrotnej, aby nigdzie nie zachodziło zużycie „potęgi poruszającej" bez jednoczesnego naruszenia „równowagi w cieplíku" [1]).

Zasada Carnota nie wystarcza jednak, aby odpowiedzieć na inne pytanie, często stawiane podówczas przez konstruktorów maszyn parowych: czy użycie w danym cyklu przemian innego ciała czynnego nie wpłynie na zmianę wytworzonej „potęgi poruszającej".

---

[1]) Drugi ten warunek sprowadza się do założenia, że dane przemiany zachodzą bez tarcia. Należy zaznaczyć, że uzasadnienie przez Carnota drugiej części jego zasady (zużycie „potęgi poruszającej" może wywołać powstanie różnicy temperatur) jest dość niejasne. Być może nawet, że wykładnia, którą dajemy, niezupełnie odpowiadałaby poglądom Carnota, który powstawanie ciepła przy uderzeniu i przy tarciu też uważał za „naruszenie równowagi w cieplíku". Chodzi nam jedynie o zaznaczenie, że, rozumiejąc przez przywrócenie lub naruszenie równowagi w cieplíku pobranie pewnej ilości cieplika z jednego ciała i oddanie go drugiemu, można obydwa przytoczone warunki uważać za bezpośrednio wynikające z jego zasady.

Na to pytanie Carnot odpowiada, wprowadzając do swego rozumowania nową zasadę — niemożliwości „perpetuum mobile".

„Gdyby istniały sposoby użycia ciepła korzystniejsze od tych, któreśmy opracowali, to znaczy, gdyby było możliwe sprawić, zapomocą jakiejkolwiek metody, żeby cieplik wytworzył większą ilość potęgi poruszającej, niż ta, którą wytworzyliśmy w pierwszym szeregu naszych działań, wystarczyłoby ująć część tej potęgi dla pierwotnego przeniesienia w sposób, dopiero co wskazany, cieplika z ciała *B* do ciała *A*, z chłodnicy do ogniska, aby przywrócić wszystko do stanu pierwotnego i uzyskać w ten sposób możność rozpoczęcia na nowo działania zupełnie podobnego do poprzedniego i tak dalej: byłby to nietylko ruch wieczny, lecz nieograniczone stwarzanie siły poruszającej bez zużywania się czy to cieplika, czy też jakiegokolwiek innego czynnika. Podobne stwarzanie jest wręcz przeciwne poglądom, dotychczas nabytym, prawom mechaniki i zdrowej fizyki.

Być może, spotkam się tutaj z zarzutem, że ruch wieczny [1]), którego niemożliwość jest dowiedziona dla samych tylko działań mechanicznych nie jest, być może, niemożliwy, skoro się użyje wpływu czy to ciepła, czy to elektryczności, czyż można jednak pojmować zjawiska ciepła i elektryczności, jako powstające z czegoś innego, niż z jakichś ruchów ciał [2]), i czy jako takie nie muszą one podlegać ogólnym prawom mechaniki? Czy nie wiadomo zresztą a posteriori, że wszystkie próby wytworzenia w jakikolwiek sposób ruchu wiecznego były bezpłodne... Pojmowanie ogólne i filozoficzne słów ruch wieczny musi obejmować nietylko ruch, mogący trwać nieograniczenie po otrzymaniu pierwszego popędu, lecz również działanie przyrządu, jakiegokolwiek zespołu, mogącego tworzyć potęgę poruszającą w ilości nieograniczonej, mogącego wytrącić kolejno wszystkie ciała przyrody ze stanu spoczynku, jeżeliby były w nim pogrążone, zniszczyć w nich zasadę bezwładności, zdolnego wreszcie do czerpania z samego siebie sił, potrzebnych do poruszenia całego wszechświata, do podtrzymania, do ciągłego przyspieszania jego ruchu"...

---

[1]) Słowa te należałoby zastąpić raczej słowami „motor wieczny"; ruch bowiem wieczny nie jest sprzeczny z zasadami mechaniki.

[2]) Nie sądzimy, aby to niejasne naogół zdanie stanowiło dowód, że Carnot uważał ciepło lub elektryczność za zjawiska, wywołane przez pewien ruch cząstek ciała. Należy raczej sądzić, że Carnotowi chodziło o zjawiska ruchu ciepła i ruchu elektryczności. W takiem oświetleniu zdanie to nie przeczy teorji cieplika i płynu elektrycznego.

Stąd więc wynika, że „potęga poruszająca ciepła jest niezależna od czynników, użytych do jej urzeczywistnienia; ilość jej jest wyznaczona jedynie przez temperatury ciał, między któremi zachodzi ostatecznie przenoszenie cieplika".

Otrzymujemy więc twierdzenie równie ogólne, jak twierdzenia mechaniki, twierdzenie, które jednak bezpośrednio z zasady Carnota nie wynika. Ale użycie zasady, właściwej mechanice, odpowiada, według Carnota, istocie samego zjawiska. Posiada ono bowiem dużą analogję ze znanemi zjawiskami mechanicznemi i kto wie, czy ta analogja nie była dla Carnota nicią przewodnią w jego dociekaniach.

„Według tych pojęć, któreśmy dotychczas ustalili, można z dostateczną słusznością porównać potęgę poruszającą ciepła z potęgą poruszającą spadku wody: obiedwie mają maximum, którego nie mogą przekroczyć, jakąkolwiek byłaby z jednej strony maszyna, użyta do pobierania działania wody i jakąkolwiek byłaby z drugiej strony substancja, użyta do pobierania działania ciepła. Potęga poruszająca wodospadu zależy od jego wysokości i od ilości cieczy; potęga poruszająca ciepła zależy również od ilości użytego cieplika [1]) i tego, co możnaby nazwać i co w istocie będziemy nazywali wysokością jego spadku, to znaczy, różnicy temperatur ciał, między któremi zachodzi wymiana cieplika. W wodospadzie potęga poruszająca jest ściśle proporcjonalna do różnicy poziomu między zbiornikiem wyższym i zbiornikiem niższym. W spadku cieplika potęga poruszająca rośnie, bezwątpienia, wraz z różnicą temperatur między ciałem ciepłem i ciałem zimnem; nie wiemy jednak, czy jest do tej różnicy proporcjonalna. Nie wiemy np., czy spadek cieplika od 100^0 do 50^0 dostarcza mniej lub więcej potęgi poruszającej, niż spadek tego samego cieplika od 50^0 do 0^0. Jest to zagadnienie, które postaramy się... zbadać".

Badanie to nastręczało bardzo wielkie trudności. Dane bowiem doświadczalne jakiemi rozporządzał Carnot, były nawet w przypadku ciał najprostszych — gazów — niewystarczające do rozwiązania zagadnienia. Z doświadczeń różnych fizyków (Poissona, Gay-Lussaca, Clémenta i Desormes'a, Daltona, Delaroche'a i Bérarda, Dulonga i Petita), na których Carnot opierał się w swych wywodach, nie można było wyciągnąć tych wniosków, jakie były potrzebne Carnotowi. To też pomysłowe

[1]) Tego założenia nigdzie Carnot nie uzasadnia, uważa je, widać, za oczywiste.

jego próby znalezienia związku między wielkością „potęgi poruszającej" i różnicą temperatur ogniska i chłodnicy doprowadziły jedynie do stwierdzenia, że związek ten nie da się wyrazić prostą proporcjonalnością „spadek (bowiem) cieplika wytwarza więcej potęgi poruszającej w stopniach niższych, aniżeli w stopniach wyższych".

Próbom tym zresztą Carnot poświęca stosunkowo niewiele miejsca, być może, dlatego, że już wtedy zdawał sobie sprawę, jak kruche jest jego główne założenie, na którem oparł analogję między pracą wody i pracą ciepła — założenie materjalności, a więc co zatem idzie niezniszczalności cieplika.

„Zresztą, mówiąc nawiasem, zasadnicze podstawy, na których opiera się teorja ciepła, wymagałyby głębszego zbadania. Wydaje się, że w obecnym stanie teorji wielu faktów doświadczalnych prawie nie można wyjaśnić".

Zasada zachowania sił żywych. — Istotnie, z dwu hipotez, dotyczących istoty ciepła i przytoczonych na początku „Rozprawy o cieple" Lavoisiera i Laplace'a, hipoteza cieplika znajdowała swe potwierdzenie jedynie w pomiarach kalorymetrycznych, w których zachowanie ilości ciepła — oddanego przez jedno z ciał i pobranego przez drugie — stanowiło uzasadnienie samego pomiaru; we wszystkich innych przypadkach, gdy działaniom mechanicznym towarzyszyły zjawiska cieplne, wyjaśnienie przebiegu zjawisk na podstawie teorji cieplika było naogół bardzo trudne. Co więcej, wtedy właśnie zachodziły odstępstwa od dobrze już wówczas ugruntowanej w mechanice zasady — zachowania sił żywych.

Pierwsze jej sformułowanie możnaby widzieć we wzorach swobodnego spadku ciał, podanych przez Galileusza. Ze wzorów tych wynika, że prędkość końcowa v ciała, spadającego z wysokości h, równa jest $\sqrt{2gh}$. Stąd, mnożąc obiedwie strony równości przez m i odpowiednio przekształcając, mamy $\frac{1}{2}mv^2=mgh$, co odpowiada twierdzeniu siły żywej dla danego przypadku, które podajemy w tem brzmieniu, jakie dzisiaj obowiązuje:

zmiana połowy siły żywej równa jest sumie prac, wykonanych przez wszystkie siły układu podczas uważanego przesunięcia.

Wypływający bezpośrednio z doświadczeń Galileusza wniosek, że żadne ciało nie może podnieść swego środka ciężkości na skutek działania samego tylko swego ciężaru, został uogólniony przez Huygensa (p. Optyka) na dowolny układ ciał ciężkich i pod-

niesiony do godności zasady mechanicznej, w słynnem jego dziele „Horologium oscillatorium" (Zegar wahadłowy), wydanem w 1673 r. Podstawę do takiego uogólnienia H u y g e n s widział przedewszystkiem w fakcie, że „ciała ciężkie nie podnoszą się [same przez się] do góry" (gravia non sursum ferri), a następnie w tem, że gdyby było inaczej, możnaby było zbudować „perpetuum mobile". Twierdzenie H u y g e n s a, które, w gruncie rzeczy, nie było niczem innem, jak częściowem sformułowaniem zasady zachowania energji mechanicznej, miało ściśle ograniczony zakres zastosowań: obowiązywało ono tylko w zjawiskach wyłącznie mechanicznych i to takich, które zachodzą pod działaniem siły ciężkości; znaczenia ogólniejszego nabrało dopiero wtedy, gdy słynny spór między uczniami D e s c a r t e s'a (1596 — 1650) i L e i b n i z e m (1646 — 1716) wykazał jego wagę dla wszystkich dziedzin fizyki. Dla D e s c a r t e s'a źródłem wszystkich zjawisk fizycznych jest ruch; różnorodność wrażeń zmysłowych, jakie odczuwamy, jest spowodowana przez różne jego odmiany; i z tej jego powszechności wypływa jego niezniszczalność.

„Dowodzi tego... p i s a ł D e s c a r t e s w s w y c h „Z a s a d a c h f i l o z o f j i" (Principia philosophiae), w y d a n y c h w 1643 r.... niezmienność działań Boga, zachowującego nieprzerwanie świat tem samem działaniem, jakiem go ongiś stworzył... Ruch [ten] nie jest związany stale z temi samemi częściami materji, lecz przechodzi z jednych do drugich, zależnie od ich wzajemnych spotkań... Posiada on przeto pewną i oznaczoną ilość, która, jak to łatwo rozumiemy, musi być zawsze taka sama w całym wszechświecie, jakkolwiek może się zmieniać w poszczególnych jego częściach. To znaczy, że, gdy jedna część materji porusza się dwa razy prędzej, niż druga, ta druga zaś jest dwa razy większa, niż poprzednia, mówimy, że tyleż ruchu jest w mniejszej, co w większej" [1]).

To twierdzenie, które moglibyśmy nazwać zasadą zachowania ilości ruchu i które w tem ogólnikowem i nieścisłem sformułowaniu nie może być uważane za słuszne, nazwał L e i b n i z „pamiętnym błędem Descartes'a" (error memorabilis Cartesii) (1686 r.). I dla niego tak, jak dla Descartes'a, ruch stanowił istotę wszystkich zjawisk i on także z tej jego cechy wyprowadzał wniosek o zachowaniu

---

[1]) Przytoczone, jak i inne ustępy z D e s c a r t e s'a, według wydania paryskiego pod redakcją C h. A d a m a i P. T a n n e r y'ego. Wyd. L. Cerf. Paris. „Principia philosophiae" stanowią część tomu 8-ego.

ruchu: przyczyna bowiem zawsze jest równoważna skutkowi. Działanie jednak siły lub poprostu siła, jak przez długie jeszcze lata mówiono, nadając w ten sposób terminowi Newtonowskiej siły zgoła odmienne i dość nieokreślone znaczenie, nie wyraża się przyrostem prędkości. Nie to jest ważne, że dla udzielenia danemu ciału prędkości podwójnej potrzebna jest siła dwa razy większa, zasadniczą miarą działania jest „siła", którą trzeba zużyć na podniesienie danego ciała na pewną wysokość. Otóż, ze wzoru Galileusza wynika, że prędkość ciała rzuconego pionowo do góry musimy zwiększyć dwa razy, aby ciało podniosło się cztery razy wyżej; stąd wniosek, że działanie to, pozostając proporcjonalnem do masy ciała, będzie proporcjonalne do drugiej, nie do pierwszej potęgi prędkości. Temu działaniu Leibniz nadał nazwę „siły żywej", „siłą martwą" oznaczając zwykłe ciśnienie lub ciągnienie, i wskazując przez użycie tej terminologji, wyraźniej jeszcze może, niż przez rozumowanie poprzednie, na swą pod tym względem zależność od Galileusza. Zbliżoną bowiem nazwę „ciężaru martwego" (peso morto), użytą w podobnem znaczeniu, spotykamy w szóstym dniu „Rozmów i dowodzeń" (Dioscorsi e dimostrazioni), częściowo tylko opracowanym przez Galileusza i zawierającym opis badań jego nad uderzaniem się ciał. Otóż rozwój fizyki sprawił, że to właśnie zjawisko, dokładnie zbadane przez Huygensa, Wallisa, Wrena, dostarczyło głównego argumentu przeciwnikom Leibniza. O ile bowiem w przypadku uderzenia się ciał sprężystych suma iloczynów mv^2 [1]), obliczona dla obydwu uderzających się ciał, pozostawała po uderzeniu taką samą, jak i przed uderzeniem, to w przypadku ciał niesprężystych równość powyższa już nie obowiązywała; suma sił żywych po uderzeniu była mniejsza, niż przed uderzeniem. Zasada zaś zachowania ilości ruchu obowiązywała, o ile chodziło o t. zw. uderzenie środkowe, w obydwu rozpatrywanych przypadkach. Ta trudność nie istniała jednak dla Leibniza.

„Utrzymywałem, że siły czynne zachowują się na tym świecie. Zarzucają mi, że dwa ciała miękkie, niesprężyste tracą swoją siłę. Odpowiadam, że nie. Prawda, że całości tracą ją względem swego ruchu całkowitego, lecz części ją otrzymują, będąc wewnętrznie poruszane siłą spotkania. Tym sposobem brak ten zachodzi tylko pozornie. Siły nie są niszczone, lecz rozpraszane między drobne części.

---

[1]) Współczynnik $^1/_2$ wprowadził Coriolis w 1829 r.

Nie znaczy to stracić je, ale postąpić, jak ci, którzy zmieniają większe monety na drobne"[1]).

Żadnemi jednak faktami doświadczalnemi nie mógł Leibniz poprzeć swojego twierdzenia. Jakim zjawiskom, które moglibyśmy obserwować, odpowiadają owe ruchy, „rozpraszane między drobne części", jaka wielkość, dostępna naszym pomiarom, odpowiada ich sile żywej, tych pytań fizyka ówczesna rozstrzygnąć nie mogła.

To też i Jan Bernoulli (1667 — 1748), który poglądy Leibniza całkowicie przyjął i rozwinął, mógł je uzasadniać jedynie przykładami z mechaniki, co zresztą, według jego mniemania, nie zmniejszało bynajmniej ich ogólności.

„Dowodzić bowiem tego prawa [zachowania siły żywej] znaczyłoby go zaciemniać. Istotnie, wszyscy uważają za bezsporną prawdę, że żadna działająca przyczyna nie może zniknąć ani całkowicie, ani częściowo bez wytworzenia skutku, równego jego stracie. Pojęcie siły żywej, o ile ona istnieje w poruszającem się ciele, jest czemś bezwzględnem, niezależnem i tak pewnem, że siła ta powinna pozostać w ciele nawet w tym przypadku, gdyby cały pozostały wszechświat zginął. Jest więc rzeczą oczywistą, że, jeżeli siła żywa ciała zmniejsza się lub zwiększa przy spotkaniu z innem ciałem, to siła żywa tego drugiego ciała powinna ze swej strony zwiększać się lub zmniejszać w tym samym rozmiarze; zwiększanie się jednej jest prostym wynikiem zmniejszania się drugiej: a to z konieczności pociąga za sobą zachowanie całej ilości sił żywych; ilość ta przeto bezwzględnie nie zmienia się przy uderzaniu"[2]).

Stopniowo jednak w miarę posuwania się badań nad ciepłem i wzrastającego znaczenia teorji cieplika, rozwinięcie tego rodzaju poglądów natrafiało na coraz większe trudności. Syn Jana Bernoulli'ego Daniel (1700 — 1782) poprzestał też na stosowaniu zasady sił żywych do mechaniki, przyczem okazało się, że może ona oddawać ogromne usługi nawet przy rozpatrywaniu tak złożonych zjawisk, jak ruch cieczy. Jemu to i Eulerowi (1707 — 1783) zawdzięczamy ugruntowanie się jej w mechanice końca 18-go stulecia. Wszelkim jednak próbom uogólnienia jej dalszego przeciwstawiała się wyraźnie zasada niezniszczalności cieplika. Doświadczenia Rumforda (1798 r.) i Davy'ego (1799 r.), które dziś sta-

---

[1]) Cytowane według E. Meyersona. L'identité et realité. Paris. F. Alcan 1908 r.
[2]) Cyt. według Meyersona l. c.

nowią dla nas jeden z dowodów równoważności ciepła i pracy, tego znaczenia podówczas mieć nie mogły. Ani bowiem Rumford, który obserwował nagrzewanie się bloku bronzowego podczas wiercenia w nim otworu, ani Davy, który stwierdził, że dwa trące się o siebie kawałki lodu topią się w miejscu zetknięcia, nie udowodnili faktu, który jedynie mógł mieć znaczenie decydujące — proporcjonalności między pozornie zniszczoną pracą[1]) i ilością wytworzonego ciepła. Dopóki to nie było stwierdzone, można było zawsze, nie bez pewnych pozorów słuszności, zakładać, że praca odgrywa w tych zjawiskach rolę czynnika wyzwalającego, podobnie jak przerwanie tamy w stosunku do energji wody w zbiorniku, przez tę tamę zamkniętym. Tak też objaśniali te doświadczenia zwolennicy teorji płynu cieplnego.

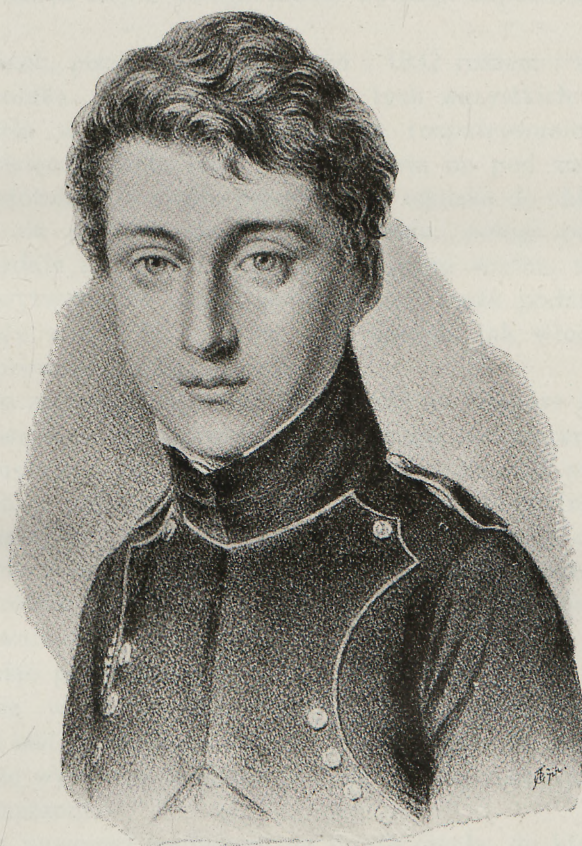
Początki zasady zachowania energji. — Prace Mayera. — Mimo to jednak Leibnizowskie poglądy nigdy nie przestawały mieć swych stronników. Wymowne tego świadectwo daje książka inżyniera francuskiego Séguina, wydana w 1839 r. p. t. „O wpływie dróg żelaznych" (De l'influence des chemins de fer), w której autor stwierdza, że wujowi swemu, słynnemu Montgolfierowi zmarłemu w 1801 r., zawdzięcza pogląd: „iż musi zachodzić między cieplikiem i ruchem tożsamość istoty, wskutek czego obydwa te zjawiska są przejawem jednej i tej samej przyczyny[2]).

Istotnie, trudno było się pogodzć z faktem, że siła żywa, jaką posiada ciało w ruchu, może być całkowicie stracona, gdy ciało to zatrzyma się na skutek tarcia lub uderzenia o nieruchomą przegrodę; co się wtedy dzieje z „potęgą poruszającą", jaką to ciało posiadało. Podobne pytanie zjawiało się i w przypadku, rozpatrywanym przez Carnota: ciepło, przechodząc w sposób przez Carnota wskazany z ciała cieplejszego do zimniejszego, wytwarza pewną „potęgę poruszającą"; co się dzieje z tą „potęgą", gdy ciepło przez proste przewodzenie przejdzie od ciała o wyższej do ciała o niższej temperaturze. Wobec takich zagadnień można było zająć albo takie stanowisko, jak pierwszy z komentatorów pracy Carnota Clapeyron (1834 r.), który uważał stratę tę za fakt doświadczalny, nie wymagający dalszych wyjaśnień, albo też takie, jak William Thomson (p. niżej), który uważał za konieczne dokładne ich wyjaśnienie.

---

[1]) Termin ten wprowadził Poncelet w 1826 r.

[2]) Cyt. według Macha l. c.



SADI CARNOT

Wyd. „Mathesis Polska".



„Gdy czynnik cieplny, pisał W. Thomson w 1849 r. po zapoznaniu się z pracą Carnota, jest tym sposobem zużyty na przewodzenie ciepła przez ciało stałe, co się staje z działaniem mechanicznem, które on może wytworzyć? Nic nie może zginąć w procesach natury — energja[1]) nie może być zniszczona. Jaki więc skutek jest wytworzony na miejsce straconego działania mechanicznego? Doskonała teorja ciepła kategorycznie wymaga odpowiedzi na to pytanie" [2])...

W notatkach, pisanych między 1824 i 1832 rokiem i stanowiących rodzaj dziennika, można znaleźć ślady tych wszystkich wątpliwości, jakie budziło w Carnot'cie bliższe rozpatrywanie zagadnień, którym poświęcona była jego praca. Stawia on pod znakiem zapytania, czy istotnie całe ciepło przechodzi z ogniska do chłodnicy i czy część jego nie zużywa się na wytworzenie „potęgi poruszającej", spornem wydaje mu się twierdzenie, że „para wodna, użyta w maszynie do wytwarzania potęgi poruszającej, może podnieść [temperaturę] wody w chłodnicy w ten sam sposób, jak wtedy, gdy jest do niej doprowadzona bezpośrednio".

Stopniowo zaczyna znajdować odpowiedź na niektóre z tych pytań i dochodzi wreszcie do wniosku, że „ciepło nie jest niczem innem, jak potęgą poruszającą lub raczej ruchem, który zmienił swoją postać. Jest to ruch w cząstkach ciał. Wszędzie, gdzie zachodzi zniszczenie potęgi poruszającej, zachodzi jednocześnie wywiązanie ciepła w ilości dokładnie proporcjonalnej do ilości zniszczonej potęgi poruszającej. Odwrotnie, wszędzie, gdzie zachodzi zniszczenie ciepła, zachodzi wytwarzanie potęgi poruszającej.

Można więc postawić jako zasadę ogólną, że potęga poruszająca znajduje się w przyrodzie w ilości niezmiennej, że nigdy, ściśle mówiąc, nie jest wytwarzana ani niszczona. Coprawda, zmienia postać, to znaczy, że wytwarza to jeden to drugi rodzaj ruchu; nigdy jednak nie jest zniszczona.

Zgodnie z pewnemi poglądami na teorję ciepła, do których doszedłem, wytwarzanie jednostki potęgi poruszającej wymaga zniszczenia 2,70 jednostek ciepła" [3]).

---

[1]) Termin „energja" był użyty po raz pierwszy, jak się zdaje, w znaczeniu przybliżonem do używanego obecnie przez J. Bernoulli'ego, który rozumiał przezeń iloczyn z siły przez „prędkość przygotowaną". Young oznaczał tem słowem ilość ruchu (1807).

[2]) Cyt. według Macha l. c.

[3]) Cyt. według Macha l. c.

Jednostką pracy, której C a r n o t używał, była t. zw. dynamia, równa pracy, wykonanej przy podnoszeniu 1 m^3 wody na wysokość 1 m., a więc prawie dokładnie równa 1000 Kgm. Mechaniczny przeto równoważnik ciepła wynosił, według C a r n o t a, $\frac{1000}{2,70}=370$ Kgm.

Notatki C a r n o t a pozostały jednak nieznane aż do roku 1878, kiedy po raz pierwszy ukazały się w druku. Za pierwszą więc pracę, stwierdzającą równoważność ciepła i pracy, musimy uważać pracę lekarza niemieckiego M a y e r a, wydaną w 1842 r. p. t. „Uwagi o siłach przyrody nieożywionej" (Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur).

MAYER (J u l i u s R o b e r t) urodził się 15 listopada 1814 r. w Heilbronn. W rodzinnem mieście ukończył gimnazjum i następnie udał się w 1832 roku na uniwersytet do Tybingi (Tübingen). Los zdarzył, że w czasie pobytu M a y e r a w tym uniwersytecie katedra fizyki wakowała, i M a y e r nie mógł przesłuchać całkowitego kursu fizyki, co sprawiło, że nie miał później systematycznych wiadomości z tej dziedziny. W Tybindze pozostawał nie długo; za należenie do tajnego stowarzyszenia został z uniwersytetu wydalony. Udał się wtedy do Monachjum, a następnie do Wiednia; wreszcie w 1838 roku pozwolono mu zdawać w Tybindze egzamin doktorski. Po ukończeniu uniwersytetu M a y e r wstąpił w charakterze lekarza do marynarki holenderskiej i w 1840 roku odpłynął na Jawę. W tej podróży nagle, jak sam twierdzi, przy puszczaniu krwi marynarzom w porcie Surabaya błysnęła mu myśl, która od tego czasu miała być treścią jego życia. Okoliczności były następujące: zauważył on, że kolor krwi płynącej z żył był tak jasny, jak gdyby krew płynęła z tętnic. Rozpytując ludzi, obeznanych z warunkami życia podzwrotnikowego, dowiedział się, że jest to fakt ogólny pod zwrotnikami; M a y e r wkrótce znalazł zupełne wytłumaczenie tego zjawiska w zmniejszeniu procesów utleniania: wobec wysokiej temperatury zewnętrznej ciało mniej spala substancyj dla zachowania swej własnej temperatury. Zdaje się jednak, że ani ten fakt ani uwaga starego pilota, że morze po burzy bywa zazwyczaj cieplejsze, nie naprowadziły M a y e r a bezpośrednio na myśl o zachowaniu energji; były one, prawdopodobnie, jeszcze jednem potwierdzeniem jego uprzednich założeń. Założenia te zostały wyraźnie wypowiedziane w niżej przytoczonej pracy p. t. „Uwagi o siłach nieożywionej przyrody". Praca ta pojawiła się w druku w 1842 r. w „Rocznikach chemji i farmacji", wy-

dawanych przez Liebiga. Powodem bezpośrednim tego, że Mayer zwrócił się ze swą rozprawą do miesięcznika chemicznego, nie zaś fizycznego, był zatarg jego z Poggendorffem, podówczas redaktorem „Roczników fizyki i chemji". Jeszcze w 1841 r. Mayer przesłał Poggendorffowi pierwszą swoją pracę „O ilościowem i jakościowem oznaczeniu sił". Z powodów bliżej nieznanych Poggendorff nie tylko nie wydrukował pracy Mayera, lecz nawet mu nie odpisał i nie zwrócił rękopisu. (Praca ta została ogłoszona drukiem dopiero w 1877 r. po śmierci Poggendorffa).

Ogłoszenie „Uwag o siłach nieożywionej przyrody" nie naprawiło stosunków Mayera z oficjalnym światem fizyków, przeciwnie nawet, od tej chwili zaczęła się gorąca walka o wydarcie Mayerowi pierwszeństwa i ostentacyjne lekceważenie jego prac, dochodzące do tego, że pracę swą następną „O ruchu organicznym w jego związku z przemianą materji" musiał ogłosić w 1845 r. swoim kosztem. To wszystko silnie podkopało zdrowie Mayera. 28 maja 1850 r. w napadzie gorączki wyskoczył on oknem i złamał obiedwie nogi. Skorzystano z tego wypadku, i mimo, że w końcu tegoż roku wykończył on swe cenne „Uwagi o mechanicznym równoważniku ciepła", został zamknięty w domu warjatów, gdzie wśród najcięższych warunków przebył dwa lata. Ze szpitala wyszedł zupełnie złamany. Ostatnie lata życia spędził w takiem odosobnieniu, że w 1858 roku Liebig, mówiąc w jednym ze swych odczytów o jego zasługach, twierdził, że „umarł on niestety w domu warjatów". Dopiero pod koniec życia doczekał się powszechnego uznania. Umarł w 1878 roku. Odkrycie olbrzymiej wagi, którego dokonał, nie tylko, jak trafnie robi uwagę W. Ostwald, nie przyniosło mu szczęścia, lecz przeciwnie uczyniło go na całe życie nieszczęśliwym.

W pewnem przeciwieństwie do rozumowania Carnota wywody Mayera nie są związane z żadną szczególną hipotezą o cieple, jako pewnym rodzaju ruchu. Podobnie, jak Leibniz, uważa Mayer zasadę przyczynowości, albo raczej pewnik, że „przyczyna równa jest skutkowi", za dostateczne uzasadnienie swych twierdzeń. Należy tylko (i to jest warunkiem koniecznym, inaczej twierdzenia te byłyby pustym dźwiękiem) ustalić rodzaje przyczyn i skutków z nich wynikających, znaleźć wspólną dla nich miarę, aby móc doświadczalnie przekonać się o słuszności założeń. Tu leży źródło klasyfikacji „przyczyn", omówionej we wstępnym rozdziale

pracy M a y e r a[1]). Jako pierwszą z przyczyn rozpatruje „siłę", rozumiejąc ten termin w tem samem, co L e i b n i z znaczeniu; siła Newtonowska jest dla niego jedynie własnością, nie podpada więc pod ogólną zasadę równoważności. Wysunięcie na pierwszy plan „siły", nie zaś drugiej przyczyny „materji", o której krótko tylko w tekście wpomina, jest uwarunkowane dwoma względami. Przedewszystkiem, zachowanie materji dotyczy głównie zjawisk chemicznych, któremi w danej pracy M a y e r się nie zajmuje, następnie z dwu tych pojęć materja i siła, pierwsze jest bardziej znane i mniej daje pola do nieporozumień.

„Gdy przez nazwę „materja" nadajemy przedmiotowi wyraźnie oznaczone własności, jako to ciężkość, zajmowanie miejsca w przestrzeni, z nazwą siły łączy się przedewszystkiem pojęcie czegoś nieznanego, niezbadanego, hipotetycznego".

Dlatego też „próba nadania pojęciu siły równej dokładności, jaką posiada pojęcie materji, i wyznaczenia tym sposobem przedmiotów istotnego badania nie powinna być wraz z wypływającemi stąd wnioskami nieprzychylnie przyjęta przez zwolenników jasnego, wolnego od hipotez poglądu na przyrodę".

„Siły są przyczynami; wobec tego można do nich całkowicie zastosować podstawowe twierdzenie: causa aequat effectum" [2]).

Jeżeli przyczyna c ma działanie e, to $c = e$; jeżeli znów e jest przyczyną innego działania f, to $e=f$, i stąd $c=e=f... =c$. W łańcuchu przyczyn i działań żaden wyraz, jak to z samej istoty równania wynika, ani żadna część wyrazu nie może stać się zerem. Tę pierwszą własność wszystkich przyczyn nazywamy ich n i e z n i s z c z a l n o ś c i ą.

Jeżeli dana przyczyna c wywołała równe sobie działanie e, to tym sposobem c przestało istnieć; c stało się e; gdyby, po wywołaniu e, c pozostało częściowo lub w całości, to tej pozostałej przyczynie musiałoby odpowiadać jeszcze dalsze działanie, c byłoby przeto naogół $> e$, co jest przeciwne założeniu $c=e$. Ponieważ tym sposobem przeszło c w e, e w f i t. d., musimy te wielkości uważać za

[1]) Nie mając możności znaleźć pracy M a y e r a w oryginalnem wydaniu, posługiwaliśmy się przy jej tłumaczeniu przedrukiem w „Voigtländer's Quellenbücher", Tom 12 „Robert Mayer. Uber die Erhaltung der Kraft" herausgegeben von Dr. Albert Neuburger. Przedruk ten nie jest jednak kompletny. Niektóre ustępy, jak zaznacza w przedmowie wydawca, zostały opuszczone. Niestety, opuszczenia te w tekście nie zostały zaznaczone.

[2]) Przyczyna równa jest skutkowi.

różne postacie zjawiskowe jednego i tego samego przedmiotu. Zdolność przybierania różnych postaci jest drugą istotną własnością wszystkich przyczyn. Złączywszy obiedwie własności powiemy: przyczyny są przedmiotami (ilościowo) niezniszczalnemi i (jakościowo) przemiennemi.

W przyrodzie istnieją dwa rodzaje przyczyn, między któremi, jak wykazuje doświadczenie, niema żadnego przejścia. Jeden rodzaj tworzą przyczyny, posiadające własności ważkości i nieprzenikliwości— materje; drugi — przyczyny, nie mające owych własności — siły, z powodu wyżej wspomnianych ujemnych własności nazywane też nieważkiemi. Siły są więc przedmiotami niezniszczalnemi, przemiennemi i nieważkiemi.

Przyczyna, wywołująca podniesienie ciężaru, jest siłą; działanie jej, podniesiony ciężar, jest również siłą; ogólniej można to wyrazić w ten sposób: przestrzenna różnica przedmiotów ważkich jest siłą; ponieważ ta siła wywołuje spadek ciał, nazywamy ją siłą spadku. Siła spadku i spadek, i ogólniej siła spadku i ruch są siłami, które się zachowują, jak przyczyna i działanie, siłami, przechodzącemi jedna w drugą, dwiema różnemi postaciami zjawiskowemi jednego i tego samego przedmiotu. Przykład: ciężar spoczywający na ziemi nie jest siłą; nie jest on przyczyną ani ruchu, ani podniesienia innego ciężaru; będzie nią jednak w stopniu, na jaki go podniesiemy ponad ziemię; przyczyna, odległość ciężaru od ziemi, i działanie, wywiązana ilość ruchu [1]), są, jak o tem wiadomo z mechaniki, w oznaczonym związku.

O ile się uważa ciężkość jako przyczynę spadku, mówi się o sile ciężkości i miesza się tym sposobem pojęcie siły i własności... Jeżeli nazywamy ciężkość siłą, to myślimy o przyczynie, która wywiera działanie, sama się nie zmniejszając, co pociąga za sobą nieprawidłowe wyobrażenie o przyczynowej zależności rzeczy. Aby ciało mogło upaść, do tego jest równie potrzebne jego podniesienie, jak i jego ciężar, nie można więc jedynie ciężarowi przypisywać spadku ciał.

— — — — — — — — — — — — — — — — —

W niezliczonych przypadkach widzimy, jak ruch ustaje, przyczem nie wywołuje on innego ruchu lub podniesienia ciężaru; siła jednak, która raz istniała, nie może stać się zerem; zjawia się przeto pytanie,

---

[1]) Jak wynika z listów, pisanych do przyjaciół, dla Mayera różnica między ilością ruchu i siłą żywą przez długi czas pozostawała niejasną.

jaką dalszą postać może przybrać siła, którąśmy poznali jako siłę spadku lub ruch. Odpowiedź na to pytanie może nam dać jedynie doświadczenie. Aby celowo wykonać doświadczenie, musimy wybrać takie narzędzie, które pozatem, że istotnie mogłoby wywołać ustanie ruchu, ulegałoby możliwie małym zmianom pod wpływem przedmiotów użytych do badania. Jeżeli np. potrzemy jedną płytę metalową o drugą, to zobaczymy, że ruch znika, a za to występuje ciepło; zjawia się więc pytanie, czy r u c h jest przyczyną ciepła? Aby się upewnić co do tego stosunku, musimy roztrząsnąć pytanie, czy w niezliczonych wypadkach, kiedy kosztem ruchu zjawia się ciepło, ruch nie wywiera innego działania poza wytwarzaniem ciepła, i czy ciepło nie ma innej przyczyny poza ruchem?

— — — — — — — — — — — — — — — — —

Tak samo, jak nie można zdać sobie sprawy ze znikania ruchu bez uznania przyczynowego związku między ruchem i ciepłem, nie można również wyjaśnić bez pomocy tego założenia powstawania ciepła tarcia. Nie może ono być objaśnione zmniejszeniem objętości trących się ciał. Można bowiem stopić przy pomocy tarcia dwa kawałki lodu w próżni... Woda przez silne wstrząsanie doznaje, jak to znalazł autor, podniesienia temperatury. Woda nagrzana (od 12° do 13° C) przybiera po wstrząsaniu większą objętość, niż przed wstrząsaniem, skąd więc pochodzi ilość ciepła, którą można dowolnie często wywołać w tym samym przyrządzie przez powtarzanie wstrząsania? Hipoteza drgań cieplnych skłania się ku twierdzeniu, że ciepło jest skutkiem ruchu, nie obejmuje jednak w całości tego stosunku przyczynowego, lecz główny nacisk kładzie na owe niemiłe drgania.

Jeżeli więc jest wykluczone, aby dla znikającego ruchu można było w wielu przypadkach (exceptio confirmat regulam[1]) znaleźć inne działanie, niż ciepło, — dla powstającego ciepła inną przyczynę, niż ruch, to oddamy pierwszeństwo założeniu, że ciepło powstaje z ruchu, nie zaś założeniu, że przyczyna istnieje bez działania, i działanie bez przyczyny. Tak samo postępuje chemik, gdy zakłada istnienie związku między *H* i *O* z jednej i wodą z drugiej strony, zamiast przypuszczać, że *H* i *O* znikają bez śladu, woda zaś powstaje w niewyjaśniony sposób.

Naturalny związek, zachodzący między siłą spadku, ruchem i ciepłem, możemy sobie uzmysłowić w sposób następujący. Wiemy, że

---

[1]) Wyjątek potwierdza prawidło.

ciepło zjawia się wtedy, gdy oddzielne cząstki masy danego ciała zbliżają się ku sobie, zgęszczenie wzbudza ciepło; to, co obowiązuje najmniejsze cząstki masy i najmniejsze przestrzenie, leżące między niemi, musi również znaleźć swe zastosowanie do dużych mas i do przestrzeni, które można mierzyć. Spadek ciężaru jest istotnem zmniejszeniem się objętości ciała ziemi, musi więc być z nim w związku ciepło, które się wtedy wywiązuje; ciepło to musi być dokładnie proporcjonalne do wielkości ciężaru i początkowej jego odległości...

Tak samo jednak, jak ze związku, zachodzącego między siłą spadku i ruchem, nie możemy wnioskować: istotą siły spadku jest ruch, nie możemy również wyciągnąć takiego wniosku dla ciepła. Możemy raczej uważać, że ruch, czy jest on ruchem prostym, czy też drgającym, jak światło, promieniowanie cieplne i t. d., musi, aby mógł stać się ciepłem, ustać, przestać być ruchem. Jeżeli siła spadku i ruch równa się ciepłu, to ciepło musi być, rzecz prosta, równe ruchowi i sile spadku. Tak, jak ciepło powstaje, jako działanie przy zmniejszaniu się objętości i ustawaniu ruchu, tak samo ciepło, jako przyczyna, znika przy powstaniu swoich działań, ruchu, powiększeniu objętości, podniesieniu ciężaru.

W maszynach wodnych powstający i znów znikający ruch wytwarza ciągle znaczne ilości ciepła, kosztem zmniejszenia się objętości, jakiego doznaje ciało ziemi przez spadek wody; odwrotnie, machiny parowe służą znów do zamiany ciepła na ruch lub podniesienie ciężaru. Lokomotywa ze swym pociągiem może być porównana do aparatu destylacyjnego; umieszczone pod kotłem ciepło przechodzi w ruch, ruch zaś na osiach kół przechodzi w znacznej ilości w ciepło.

Kończymy nasze twierdzenia, które siłą rzeczy wynikają z założenia „causa aequat effectum" i są w zupełnej zgodzie ze wszystkiemi zjawiskami przyrody, wnioskiem natury praktycznej. Dla rozwiązania równania, zachodzącego między siłą spadku i ruchem, musi być wyznaczona doświadczalnie droga spadku w przeciągu pewnego określonego czasu, np. pierwszej sekundy; tak samo dla rozwiązania równania, zachodzącego między siłą spadku i ruchem z jednej i ciepłem z drugiej strony, musimy odpowiedzieć na pytanie jak wielką jest ilość ciepła, odpowiadająca oznaczonej ilości siły spadku lub ruchu? Musimy np. znaleźć, jak wysoko należy podnieść pewien ciężar nad powierzchnię ziemi, żeby jego siła spadku była równoważna ogrzaniu równego ciężaru wody od 0^0 do 1^0 C? To, że podobne równanie istotnie w przyrodzie zachodzi, może być uważane za ostateczny wynik poprzedzających ustępów.

Stosując wyżej ustalone twierdzenia do ciepła i zmian objętości gazów, znajdujemy, że spadek słupa rtęci, ciśnącego na gaz, równy jest ilości ciepła, wywiązanego dzięki ściskaniu; stąd zaś wynika — przy założeniu, że stosunek pojemności cieplnej powietrza atmosferycznego pod stałem ciśnieniem i w stałej objętości = 1,421, że spadek ciężaru z wysokości około 365 m. odpowiada ogrzaniu równego ciężaru wody od 0° do 1° C. Jeżeli z tym wynikiem porównamy wydajność naszych najlepszych machin parowych, zobaczymy, jak mała cząstka ciepła, użytego pod kotłem, jest istotnie zamieniana na ruch lub podniesienie ciężaru; to może służyć za usprawiedliwienie prób, dążących do wytworzenia ruchu na innej drodze, niż zniweczenie różnicy chemicznej między *C* i *O*, a mianowicie — przez przemianę w ruch elektryczności, otrzymanej na drodze chemicznej".

To obliczenie mechanicznego równoważnika ciepła, którem kończy swoją pracę M a y e r, znacznie obszerniej jest wyłożone w drugiej jego rozprawie, wydrukowanej w 1845 r. p. t. „Ruch organiczny w jego związku z przemianą materji" (Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhang mit dem Stoffwechsel). Rozumowanie M a y e r a można przedstawić w przybliżeniu w sposób następujący. Spadek słupa rtęci, cisnącego na gaz i tem samem zmniejszenie objętości gazu możemy otrzymać, ochładzając gaz np. o 1°. Ciepło oddane wtedy przez gaz będzie równe mc_p, gdzie m masa gazu, c_p — ciepło właściwe pod stałem ciśnieniem. Zmniejszywszy tym sposobem objętość, ogrzejemy ten gaz znów do 1°, tym razem jednak w stałej objętości. Ciepło pobrane przez gaz będzie równe mc_v, gdzie c_v — ciepło właściwe w stałej objętości. Doświadczenie wykazuje, że ciepło oddane przez gaz — mc_p jest większe od ciepła udzielonego gazowi mc_v. Mamy przeto pewien zysk na cieple. M a y e r zakłada, że źródłem tej nadwyżki jest praca, wykonana przez słup rtęci przy zmniejszaniu się objętości gazu. Rtęć, opadając, utrzymuje poprzednią prężność gazu kosztem swej energji potencjalnej. Praca ta równa jest $p\Delta v$, gdzie p — prężność gazu, Δv — zmniejszenie jego objętości. Stąd stosunek wykonanej pracy do nadwyżki ciepła $J = \frac{p \, . \, \Delta v}{m\,(c_p - c_v)}$
W dowodzeniu tem M a y e r milcząco przyjmował, że gaz, rozprężając się bez wykonywania pracy, nie zmienia swej temperatury. Doświadczalne potwierdzenie tego założenia mógł, coprawda, znaleźć w ogłoszonej w 1807 r. rozprawie G a y - L u s s a c a. Jest jednak rzeczą wątpliwą, czy znał tę rozprawę, wydrukowaną w prowincjo-

nalnem piśmie francuskiem. Raczej należy przypuszczać, że fakt ten, który w parę lat później badał doświadczalnie J o u l e (p. niżej), uważał za rzecz samą przez się zrozumiałą. Istotnie, dla gazów doskonałych jest on logicznym wnioskiem z prawa B o y l e'a — M a r i o t t e'a i C h a r l e s'a — G a y - L u s s a c a. Dla gazów rzeczywistych jednak ta niezmienność temperatury jest, jak tego dowiodły badania J o u l e'a i W. T h o m s o n a, jedynie przybliżoną (p. Skraplanie gazów, str. 227).

Zagadnienie równoważności ciepła i pracy stanowiło tylko część systematu M a y e r a. Postacie „siły", rozpatrywane w „Uwagach o siłach przyrody nieożywionej": „siła" spadku, „siła" ruchu i ciepło nie były jedynemi. We wspomnianej już wyżej następnej swej pracy M a y e r wprowadza inne jeszcze postacie „siły": elektryczność, prąd galwaniczny, magnetyzm, „siły" chemiczne i t. d. Wszystkie one podlegają jednemu i temu samemu prawu „podczas wszystkich przemian fizycznych i chemicznych dana siła pozostaje wielkością stałą" [1]. Nic bowiem nie powstaje z niczego i dla tego też „siła" jest „przedmiotem niezniszczalnym". „To, co chemja ma wykonać w stosunku do materji, fizyka musi wykonać w stosunku do siły. Poznać siłę w jej różnorodnych postaciach, zbadać warunki jej przekształceń, to jest jedyne zadanie fizyki, gdyż stworzenie lub zniszczenie siły leży poza granicami ludzkich myśli i czynów".

Z faktu więc, że istnieją „dwa rodzaje przyczyn, między któremi... niema żadnego przejścia" wynikają dwie podstawowe zasady: zachowania materji i zachowania „siły". Dochodzimy przeto do uogólnienia, które odda niezwykłe usługi badaniom fizycznym, i które przetrwa aż do ostatnich lat, gdy stwierdzenie istnienia „przejścia" między temi „dwoma rodzajami przyczyn" materją i energją zastąpi dwie zasady zachowania — jedną.

To samo w gruncie rzeczy uzasadnienie dawał swoim poglądom C o l d i n g, inżynier miejski w Kopenhadze, gdy w referacie, wygłoszonym w 1843 na posiedzeniu Naukowego Towarzystwa Kopenhaskiego, objaśniał doświadczenia R u m f o r d a równoważnością ciepła i pracy. Siła jest w istocie swej duchową, stwierdzał C o l d i n g, nie może więc być zniszczoną, lecz jedynie przekształconą. Podobny zresztą był punkt wyjścia szeregu znakomitych prac doświadczalnych J o u l e'a.

---

[1]) Cytaty, dotyczące drugiej pracy M a y e r a, są wzięte z M a c h a l. c.

Prace doświadczalne Joule'a, dotyczące równoważności ciepła i pracy. — „Moglibyśmy wywnioskować a priori, że takie bezwzględne zniszczenie siły żywej $\left(\frac{mv^2}{2}\right)$ nie mogłoby zachodzić, gdyż jest oczywistym absurdem przypuszczenie, że potęgi, któremi Bóg obdarzył naturę, mogą być zniszczone lub stworzone przez człowieka; posiadamy jednak nie tylko ten argument, jakkolwiek powinien on być decydującym dla każdego nieuprzedzonego umysłu" [1]).

Prace, które Joule wykonał w ciągu bardzo wielu lat, miały jedynie dostarczyć tego dodatkowego, nie decydującego, według niego, uzasadnienia.

JOULE (James Prescott) urodził się w 1818 r. w Manchesterze, umarł w 1889 r. w Sale pod Manchesterem. Pochodząc z rodziny piwowarów (dziad i ojciec Joule'a byli piwowarami) był sam z fachu piwowarem i do 1854 r. prowadził osobiście browar. W młodości uczył się chemji od sławnego chemika Daltona; to, być może, rozwinęło w nim skłonności do badań naukowych. Ojciec urządził mu laboratorjum we własnym domu. Z tego laboratorjum w Oak Field pod Manchesterem wyszły pierwsze prace Joule'a.

Właściwe badania Joule'a nad wyznaczeniem mechanicznego równoważnika ciepła poprzedzone były badaniami nad wydzielaniem się ciepła w przewodnikach, przez które przepływa prąd elektryczny. Wyniki tych badań, ogłoszone drukiem w 1840, 1841 i 1843 r., doprowadziły go do ustalenia, że ilość ciepła wywiązanego w obwodzie jest proporcjonalna do oporu przewodników i do kwadratu natężenia prądu. Ciepło to jest naogół równe ciepłu reakcyj chemicznych, któreby można otrzymać przez bezpośrednie utlenianie metali ogniwa, łącznie z wodorem; i może niekiedy stać się „utajonem", gdy w obwód włączymy woltametr i użyjemy prądu do rozkładu wody. W doświadczeniach tych jedna rzecz pozostawała dla Joule'a niejasna: można było na ich zasadzie przypuszczać, że ciepło, któreby w ogniwie o niepołączonych przewodnikiem biegunach zostało wywiązane na skutek zachodzących reakcyj chemicznych, przy wytwarzaniu prądu uległo poprostu przeniesieniu z miejsca na miejsce, ilość jego jednak pozostała bez zmiany. Jeżeli taki pogląd jest słuszny, to czy w ten sam sposób zachodzić będzie wywiązanie cie-

[1]) Cytata według Macha l. c.

pła przy użyciu prądów indukcyjnych, które nic z ciepłem chemicznem wspólnego nie mają. Wyjaśnienie tego zagadnienia wymagało nowych badań, których wyniki J o u l e przedstawił na posiedzeniu literacko-filozoficznego Towarzystwa w Manchesterze d. 21 sierpnia 1843 r. [1]). Cewka indukcyjna, umieszczona w poziomej szklanej rurze, służącej jako kalorymetr, zawieszona była między biegunami elektromagnesu; przy jej obracaniu powstawały w niej prądy indukcyjne, których natężenie można było regulować prądem w elektromagnesach i prędkością obrotu. Doświadczenie wykazało, że i w tym przypadku ciepło wywiązane jest proporcjonalne do oporu przewodnika i kwadratu natężenia prądu, a więc, że praca, zużyta na wzbudzenie prądów indukcyjnych, wywiązuje ciepło. Dla zbadania możliwości przypadku przeciwnego, niweczenia ciepła przez pracę, J o u l e zmienił nieco schemat swego doświadczenia: do cewki, podczas jej ruchu obrotowego, był doprowadzany stały prąd, który w zależności od kierunku ruchu cewki miał natężenie większe lub mniejsze. Okazało się, że rozkład chemiczny w ogniwie pozostał proporcjonalnym do tej wartości natężenia, którą prąd posiadał, gdy cewka była nieruchoma, ciepło jednak wywiązane w obwodzie było większe lub mniejsze od ciepła, odpowiadającego reakcjom w ogniwie, i to zależnie od kierunku prądu indukcyjnego [2]), a więc w tym drugim przypadku było przez pracę niweczone. To pobudziło J o u l e'a do sprawdzenia, czy istnieje jaki stały stosunek pomiędzy temi dwiema wielkościami: pracą i wywiązanem ciepłem. Wystarczyło w tym celu użyć do obracania cewki ciężarów odpowiednio połączonych z pionową osią, koło której cewka się obracała. Ciężary te, spadając, obracały cewkę i zmniejszenie się ich energji potencjalnej

[1]) P. t. „O cieplnych działaniach magnetoelektryczności i o mechanicznej wartości ciepła" (On the calorific effects of magnetoelectricity and on the mechanical value of heat).

[2]) Niech q oznacza ciepło reakcji równe, według J o u l e'a, ciepłu wywiązanemu w obwodzie w jednostce czasu przy natężeniu prądu jednostkowem. Wtedy dla prądu stałego o natężeniu i_s, mamy również $qi_s = Cri_s^2$, gdzie C współczynnik proporcjonalności. Gdy prąd indukcyjny posiada kierunek zgodny z prądem stałym, gdy więc przyrząd J o u l e'a działa, jako prądnica, natężenie prądu wzrasta i ciepło wywiązane

$$Cr(i_i + i_s)^2 \text{ jest większe od } qi_s,$$

gdy prąd indukcyjny posiada kierunek przeciwny, a więc gdy przyrząd działa, jak motor,

$$Cr(i_s - i_i)^2 \text{ jest mniejsze od } qi_s.$$

było miarą wykonanej pracy. To urządzenie, które Joule następnie niejednokrotnie stosował w swych doświadczeniach, pozwoliło mu stwierdzić, że ogrzewanie pewnej ilości wody o 1° Fahrenheita równoważne jest podniesieniu takiej samej ilości wody o 838 stóp angielskich, innemi słowy, że mechaniczny równoważnik ciepła równy jest 460 Kgm/kal. Inne doświadczenie, opisane w tej samej rozprawie, w którem Joule mierzył wzrost temperatury wody, przepychanej przez rurki włoskowate, dało liczbę 423 Kgm/kal.

Następną z kolei była praca, którą niżej podajemy w wyjątkach, i która ściśle się łączyła z metodą wyznaczania mechanicznego równoważnika ciepła przez Mayera. Jest jednak rzeczą prawie pewną, że Joule nie znał podówczas ani pracy Mayera, ani wspomnianej wyżej pracy Gay-Lussaca.

O zmianach temperatury, wywołanych przez rozrzedzenie i zgęszczenie powietrza [1]).

„W pracy [2]), odczytanej w sekcji chemicznej British Association w Cork, posługiwałem się pięknym odkryciem magneto-elektryczności, dokonanem przez Dr. Faradaya, w celu ustalenia określonych związków między ciepłem i zwykłemi postaciami potęgi mechanicznej. W pracy tej było doświadczalnie wykazane, że potęga mechaniczna, używana przy obracaniu maszyny magneto-elektrycznej, jest zamieniana w ciepło, powstające przy przechodzeniu przez zwoje prądów indukcyjnych, oraz że, z drugiej strony, potęga poruszająca maszyny elektromagnetycznej jest otrzymywana kosztem ciepła, powstającego z reakcyj chemicznych w baterji, która ją porusza. Mam nadzieję, że i w przyszłości będę mógł podać do wiadomości kilka nowych i bardzo subtelnych doświadczeń, mających na celu wyznaczenie mechanicznego równoważnika ciepła z dokładnością, jakiej wymaga jego doniosłość dla nauk fizycznych.

Obecnem mojem zadaniem jest zdanie sprawy z badań, w których, jak sądzę, udało mi się najzupełniej zastosować zasady, poparte poprzedniemi doświadczeniami, do zmian temperatury, pochodzących

---

[1]) „On the changes of Temperature produced by the Rarefaction and Condensation of Air". Tłum. z przedruku w książce „The free expansion of gases" edited by I. S. Ames, Ph. D. professor of physics in Johns Hopkins University. New-York and London. Harper and Brothers Publishers. 1898 str. 17 i nast. Jest to jeden z tomów wydawnictwa „Harper's scientific Memoirs".

[2]) Philosoph. Magaz. Serja 3. Tom XXIII, str. 263, 347, 435. 1843 r.

ze zmian gęstości ciał gazowych; jest to badanie wielkiej wagi, zarówno z praktycznego, jak i z teoretycznego punktu widzenia, a to ze względu na jego związek z teorją maszyn parowych.

Jak się zdaje, Dr. C u l l e n i Dr. D a r w i n pierwsi obserwowali obniżenie się temperatury powietrza przy jego rozrzedzaniu i jej podnoszenie się przy zgęszczaniu powietrza. Następnie inni uczeni zwrócili uwagę na ten przedmiot. Jednak dopiero D a l t o n o w i udało się zmierzyć zmianę temperatury z pewną dokładnością. Przez użycie nadzwyczaj dowcipnego sposobu sławny ten uczony wykazał, że, gdy powietrze było zgęszczone do połowy swej objętości początkowej, powstało około 50° ciepła, oraz, że z drugiej strony odpowiednie rozrzedzenie pochłania 50° [1]).

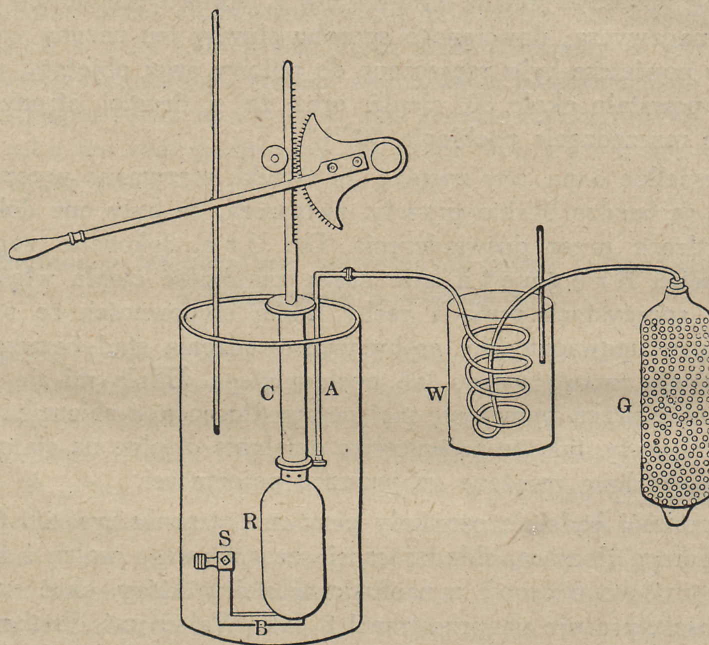
Są wszelkie dane, aby uważać, że wyniki, otrzymane przez D a l t o n a, są bardzo bliskie prawdy, zwłaszcza, że były one dokładnie potwierdzone przez doświadczenia Dr. U r e, dokonane zapomocą termometru B r e g u e t a. Ale nasza znajomość ciepła właściwego płynów sprężystych posiada cechy takiej niepewności, że nie mogłaby nas upoważnić do próby wyprowadzenia stąd bezwzględnej ilości ciepła wytworzonego lub pochłoniętego. Udało mi się usunąć tę trudność przez zanurzenie mej pompy tłoczącej i zbiornika w dużej ilości wody, tak, że przeniosłem działanie cieplne na ciało, które jest powszechnie uważane za wzorzec pojemności.

Aparat mój będzie zrozumiały przy rozpatrzeniu rys. 63. *C* wyobraża pompę tłoczącą, składającą się ze spiżowego walca i z dopasowanego tłoka o czopie z naoliwionej skóry, który, choć szczelny, z łatwością pracuje na przestrzeni 8 cali. Walec jest długi na $10^1/_2$ cala, o wewnętrznej średnicy $1^3/_8$ cala i o grubości metalu $^1/_4$ cala. Rura *A* dla doprowadzenia powietrza jest dopasowana do dolnej części walca... Miedziany zbiornik *R* o długości 12 stóp, średnicy wewnętrznej $4^1/_2$ cala, grubości $^1/_4$ cala i pojemności $136^1/_2$ cali sześciennych może być w każdej chwili przyśrubowany do pompy. Zbiornik ten jest zaopatrzony w rogową klapę stożkową, otwierającą się na dół; u podstawy jest zaopatrzony w mosiężne części *B*, wzdłuż których jest prześwidrowany otwór o średnicy $^1/_8$ cala. W *S* znajduje się kran... Przewidując, że zmiany temperatury dużej ilości wody, która była potrzebna, aby otoczyć pompę i zbiornik, będą bardzo małe, miałem dużo trudności w zaopatrzeniu się w termometr o nad-

---

[1]) Memoirs of the Literary and Philosophical Society of Manchester, Tom V, część 2, str. 251 — 525.

zwyczajnej czułości i bardzo wielkiej dokładności. Gdy dobrałem rurkę szklaną o wązkim otworze, wprowadziłem do niej słupek rtęci długości 1 cala i posuwałem go stopniowo w ten sposób, że koniec słupka w jednem położeniu zgadzał się z początkiem słupka w sąsiedniem. W każdem położeniu długość słupka była sprawdzana do $^{1}/_{4000}$ części cala, przy pomocy narzędzia, wynalezionego w tym celu przez p. D a n c e r a. Następnie rurkę pokryłem warstewką wosku



Rys. 63.

pszczelnego i każdą z poprzednio wymierzonych odległości podzieliłem stalowem ostrzem, poruszanem przez maszynę do dzielenia, na dwadzieścia równych części; podziałki te były następnie wytrawione przez wystawienie na działanie kwasu fluorowodorowego. Skala w ten sposób wytworzona była najzupełniej dowolna, i wobec tego, że rozciągała się ona jedynie między 30° i 90°, było rzeczą konieczną porównanie tego termometru z innym, zbudowanym w ten sam sposób, lecz zaopatrzonym w skalę, zawierającą punkt wrzenia zarówno jak i punkt zamarzania. Gdy to zostało uskutecznione, znalazłem, że dziesięć podziałek czułego termometru (zajmujących około $^{1}/_{2}$ cala) równało się mniej więcej stopniowi F a h r e n h e i t a;

wskutek tego, ponieważ w praktyce mogłem z łatwością odczytać gołem okiem $^1/_{20}$ każdej z tych podziałek, mogłem przy pomocy tego narzędzia wyznaczyć temperatury z dokładnością do $^1/_{200}$ stopnia. Ponieważ skala była dowolna, wskazania termometru musiały być w każdym wypadku redukowane; ta okoliczność wyjaśnia, iż podałem w tablicach temperatury z trzema dziesiętnymi znakami.

Było rzeczą ważną użyć, jako zbiornika wody, naczynia, możliwie nieprzenikliwego dla ciepła. W tym celu zaopatrzyłem się w dwa naczynia z żelaza cynowanego — jedno w każdym kierunku o cal mniejsze od drugiego, mniejsze naczynie umieściłem w większem, i przestrzeń między obydwoma szczelnie zamknąłem. Tym sposobem warstwa powietrza o tej samej prawie temperaturze, co i woda, jest utrzymana w zetknięciu ze ściankami i dnem naczynia wewnętrznego. Z innych sposobów, użytych dla zapewnienia dokładności, należy wspomnieć o odpowiednich zasłonach między naczyniami z wodą i eksperymentatorem.

Pierwsze moje doświadczenia były prowadzone w następujący sposób: Pompa i zbiornik miedziany były zanurzone w 45 funtach 3 uncjach [1]) wody, do której był następnie włożony wyżej opisany czuły termometr; jednocześnie dwa inne termometry były użyte do wyznaczenia temperatury pokoju i wody w naczyniu *W*. Po doskonałem zmieszaniu wody, odczytałem starannie jej temperaturę. Następnie pompa zaczęła pracować z umiarkowaną prędkością, dopóki w miedzianym zbiorniku nie zostały zgęszczone 22 atmosfery powietrza, osuszanego przy przechodzeniu przez naczynie *G*, napełnione małemi kawałkami chlorku wapnia. Po tych zabiegach, które zajęły od 15 do 20 minut, woda znowu była przez 5 minut mieszana tak, żeby ciepło rozeszło się jednakowo we wszystkie strony, poczem znowu odczytałem jej temperaturę.

Przyrost temperatury, obserwowany w ten sposób, powstaje częściowo wskutek zgęszczania powietrza, częściowo zaś wskutek tarcia pompy i ruchu wody podczas mieszania. Dla wyznaczenia wartości tych ostatnich źródeł ciepła, zamknąłem rurę powietrzną *A*; pompa zaś pracowała z tą samą prędkością i przez ten sam czas, co i poprzednio; następnie zaś woda była zmieszana dokładnie w tych samych warunkach, co pierwej. Następujące wskutek tego podniesienie temperatury wskazywało na ciepło, pochodzące z tarcia i t. p.

---

[1]) Funt angielski, avoir du pois, którym najczęściej posługuje się Joule, równy jest 453,59 g. Uncja jest szesnastą częścią tego funta.

Kalorymetr następnie usunięto, i, gdy zbiornik został zanurzony w wannie pneumatycznej, była zmierzona ilość powietrza, która w nim była zgęszczona, w sposób zazwyczaj używany, z poprawką na prężność pary etc. Wynik, dodany do 136,5 cali sześciennych, ilości zawartej poprzednio w zbiorniku, daje całkowitą ilość zgęszczonego powietrza.

TABLICA I.

Źródło ciepła	Liczba uderzeń pompy	Ciśnienie barometryczne	Ilość zgęszcz. powietrza w cal. sześć.	Temperatura dopływając. powietrza	Średnia temperatura pokoju	Różnica	Temperat. wody		Ciepło uzyskane
							przed doświadczeniem	po doświadczeniu	
Zgęszczenie etc. .	300	30.06	3047	56,2	57,5	2.224—	54,930	55,622	0,692
Tarcie etc. . . .	200				57,5	1.685—	55,652	55,979	0,327
Zgęszczenie etc. .	300	30.07	2924	54,8	53,5	0.817+	53,970	54,664	0,694
Tarcie etc. . . .	300				54,5	0.358+	54,675	55.042	0,36
Zgęszczenie etc. .	300	30.24	2870	53,7	52,5	0.380+	52,562	53,197	0,635
Tarcie etc. . . .	300				52,6	0.760+	53,197	53,524	0,327
Zgęszczenie etc. .	300	30.07	2939	58,8	57,5	1.794—	55,359	56,053	0,694
Tarcie etc. . . .	300				57,75	1.536—	56,053	56,375	0,322
Zgęszczenie etc. .	300	30.34	2924	55,7	53,5	2.184+	55,409	55,959	0,550
Tarcie etc. . . .	300				53,75	2.316+	55,962	56,170	0,20
Zgęszczenie etc. .	300	30.40	3033	58,1	60,0	0.174+	59,876	60,472	0,596
Tarcie etc. . . .	300				60,4	0.196+	60,478	60,713	0,235
Zgęszcz. przer. . .	300	30.20	2956	56,2		0.078—			0,643
Tarcie przec. . .	300					0,068+			0,297
Wynik popraw. . .		30.20	2956						0,346

Ciepło to rozdzieliło się między 45 funt. 3 unc. wody, 20½ funt. mosiądzu i miedzi i 6 funt. żelaza cynowanego. Było więc równoważne 13,628° na funt wody.

Siłę potrzebną do wykonania owego zgęszczenia można łatwo wyprowadzić z praw B o y l e'a i M a r i o t t e'a, które sprawdza się, jak tego dowiedli akademicy francuscy, do ciśnienia 25 atmosfer.

Niech rys. 64 przedstawia walec, zamknięty na jednym końcu, którego długość wynosi 21.654 stopy i przekrój 11.376 cali kwadrato-

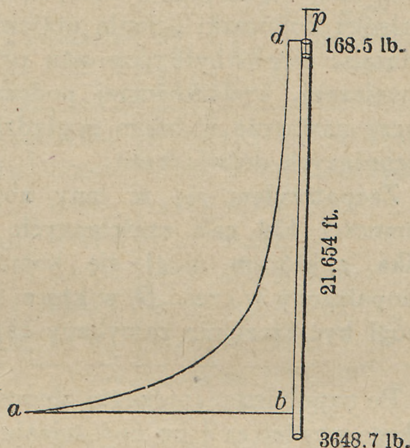


JAMES PRESCOTT JOULE

Wyd. „Mathesis Polska".



wych [1]). Wtedy jedna jego stopa będzie miała dokładnie tę samą pojemność, co zbiornik miedziany, użyty w doświadczeniach, i całkowita jego pojemność wyniesie 2956 cali sześciennych. Jest przeto oczywistem, że siła użyta do tłoczenia (przyczem pomijamy tarcie) będzie dokładnie równa tej, która wepchnęłaby tłok p na odległość jednej stopy od podstawy walca. Jeżeli wykluczymy ciśnienie zewnętrznej atmosfery, siła, działająca na tłok, gdy jest on u wierzchołka walca, będzie 186.5 funtów, co jest równoznaczne z ciężarem słupa rtęci o długości 30.2 cala i przekroju 11.376 cali kwadratowych; w odległości zaś jednej stopy od podstawy będzie ona 21.654 razy większa, a więc 3648 funtów. Pole hyperboli, *abcd*, wyobrazi przeto siłę, użytą w tym zgęszczeniu, już z uwzględnieniem ciśnienia atmosferycznego. Stosując wzór dla pól hyperbolicznych, mamy



Rys. 64.

$$S = 3648{,}7 \times 2{,}302585 \times \log\ 21{,}654 = 11220.2$$

Siła wydatkowana na zgęszczenie była przeto równoważna sile, która może podnieść 11220.2 funtów na prostopadłą wysokość jednej stopy [2]).

Porównawszy to z ilością ciepła wywiązanego mamy $\frac{11220{,}2}{13^0{,}638} = \frac{823}{1^0}$.
Tak, że musimy przy zgęszczeniu powietrza użyć siły mechanicznej, mogącej podnieść 823 funt. na wysokość 1 stopy, w celu podniesienia temperatury funta wody o jeden stopień skali Fahrenheita.

— — — — — — — — — — — — — — — — —

[1]) Cal angielski równy jest 2,54 cm.

[2]) Niech v_0 i v oznaczają objętości początkową i końcową. Praca wykonana przy zgęszczeniu równa będzie $\int_v^{v_0} p dv$. Ze wzoru Boyle'a — Mariotte'a mamy $p = \frac{p_0 v_0}{v}$. Podstawiając i całkując, otrzymamy na pracę wzór

$$w = p_0 v_0 \log nat \frac{v_0}{v}.$$

Mechaniczny równoważnik ciepła, wyprowadzony z tych doświadczeń, był tak bliski 838 funtów — a był to wynik doświadczeń magnetycznych, w których nie można było podejrzewać jakiejkolwiek domieszki „ciepła utajonego" — że przekonał mnie, iż wyiązane ciepło było poprostu przejawem w innej postaci siły mechanicznej, wydatkowanej podczas zgęszczenia. Umocniłem się jeszcze następnie w takim poglądzie na to zagadnienie zapomocą następujących doświadczeń:

Zaopatrzyłem się w inny zbiornik miedziany, który miał pojemności 134 cali sześciennych. Podobny do poprzedniego zbiornika, z którym mógł się komunikować zapomocą łącznika, był zaopatrzony w część *D*, w której był otwór o średnicy $^1/_8$ cala; otwór mógł być szczelnie zamykany zapomocą odpowiedniego kranu.

— — — — — — — — — — — — — — — — — —

Po napełnieniu [jednego] zbiornika mniej więcej 22 atmosferami suchego powietrza i po opróżnieniu [drugiego] zbiornika przy pomocy pompy pneumatycznej, ześrubowałem je razem i umieściłem w naczyniu blaszanem, zawierającem $16^1/_2$ funta wody. Woda była uprzednio dokładnie zmieszana, i temperatura jej była zmierzona tym samym czułym termometrem, który był zrobiony dla poprzedniego doświadczenia. Krany zostały wtedy otwarte zapomocą odpowiedniego klucza, co pozwoliło powietrzu przechodzić ze zbiornika pełnego do próżnego, dopóki nie ustaliła się między obydwoma zbiornikami równowaga. Następnie, woda była znów zamieszana, i temperatura jej starannie odczytana. Następująca tablica zawiera wyniki szeregu doświadczeń w ten sposób prowadzonych, naprzemian z innemi, wykonanemi dla wyrugowania skutków mieszania, parowania i t. d.

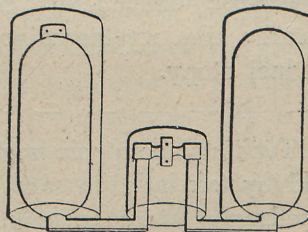
Wobec tego, że różnica między przeciętnemi rozprężeń i doświadczeń sprawdzających jest dokładnie taka, jaką znaleziono dla ogrzewającego działania temperatury pokoju w doświadczeniach sprawdzających, dochodzimy do wniosku, że nie zachodzi zmiana temperatury, gdy rozprężamy powietrze tak, aby nie wytwarzało potęgi mechanicznej.

W celu zanalizowania wyżej podanych doświadczeń odwróciłem zbiorniki, jak to wskazuje rys. 65, i zanurzyłem je, zarówno, jak i rurę łączącą, w oddzielnych naczyniach z wodą. Jeden ze zbiorników zawierał 2828 cali sześciennych zgęszczonego suchego powietrza, podczas gdy drugi był opróżniony. Gdy równowaga została przywrócona przez otwarcie kranu, znalazłem, że w zbiorniku, z którego powietrze uchodziło, powstawało 2,36^0 zimna na funt wody,

TABLICA III.

Rodzaj doświadczenia	Ciśnienie barometryczne	Ilość powietrza zgęszczonego w zbiorniku R w cal. sześć.	Przeciętna temperatura pokoju	Różnica	Temperat. wody		Zysk lub strata ciepła
					przed doświadczeniem	po doświadczeniu	
Rozprężenie . . .	30.20	2910	57.4	0.118+	57.520	57.517	0.003 straty
Dośw. sprawdz. .			57.0	0.906—	56.085	56.103	0.018 zysku
Rozprężenie . . .	30.44	2920	57.0	0.885—	56.103	56.128	0.025 „
Dośw. sprawdz. .			62.0	0.783—	61.217	61.217	0
Rozprężenie . . .	30.44	2910	62.1	0.873—	61.222	61.232	0.010 „
Dośw. sprawdz. .			58.5	0.233+	58.732	58.735	0.003 „
Rozprężenie . . .	30.44	2915	58.6	0.132+	58.732	58.732	0
Dośw. sprawdz. .			61.3	0.787—	60.508	60.518	0.010 „
Rozprężenie . . .	30.46	3200	61.3	0.780—	60.518	60.523	0.005 „
Dośw. sprawdz. .			58.0	0.186+	58.184	58.187	0.003 „
Rozprężenie . . .	30.50	2880	58.3	0.110—	58.190	58.190	0
Przec. z dośw. nad rozprężen. . . .	30.41	2956		0.400—			0.0062 zysku
Przec. z dośw. sprawdzających .				0.411—			0.0068 „
Wynik popraw. .	30.41	2956					

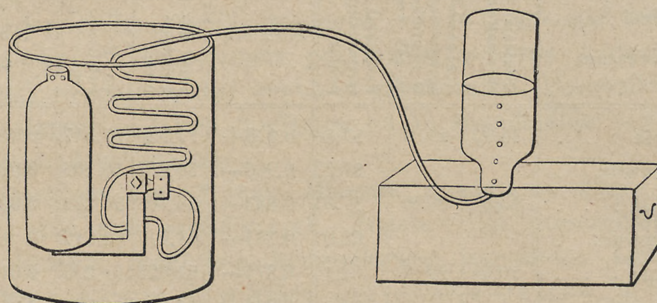
podczas gdy w drugim zbiorniku wywiązało się 2,38° ciepła, jak również 0,31° ciepła w naczyniu, w którem była zanurzona rura łącząca, tak że suma całości sprowadza się prawie do zera. Niewielka przewyżka ciepła pochodziła ze straty zimna podczas przejścia powietrza z napełnionego naczynia do kranu przez część rury, która nie mogła być zanurzona w wodzie.



Rys. 65.

Następnie był wykonany szereg doświadczeń w następujący sposób: zbiornik był napełniony suchem, zgęszczonem powietrzem, u wylotu zaś była, jak to wyobraża rys. 66, mocno przyśrubowana skręcona rura ołowiana, o średnicy wewnętrznej $= \frac{1}{4}$ cala i o długości 12 yardów. Całość była zanurzona w owalnem naczyniu, zbudowanem, jak wyżej opisane, i również zgóry była możliwie szczel-

nie przykryta. Po odczytaniu temperatury wody zapomocą czułego termometru poprzednio użytego, otworzono kran, i powietrze przeszło ze zbiornika przez wannę pneumatyczną do klosza, w którym



Rys. 66.

zbierano je starannie. Kiedy powietrze w zbiorniku zostało sprowadzone do ciśnienia atmosferycznego, woda znowu została dobrze zmieszana i temperatura jej odczytana. Po każdem z tych doświadczeń były wykonywane pomiary w celu wyrugowania skutków mieszania i t. d.

Wytworzone zimno rozdzieliło się między 21.17 funtami wody, 14 funtami miedzi, 8 funtami ołowiu i 7 funtami cynowanego żelaza. Stąd znajdujemy, że ilość zimna wytworzonego w doświadczeniu, wystarcza, aby spowodować obniżenie się temperatury funta wody o 4,085°. Jednocześnie wywiązała się siła mechaniczna, która mogła podnieść słup atmosfery o podstawie cala kwadratowego na wysokość 2723 cali; albo, innemi słowy, która mogła podnieść 3352 funty na wysokość jednej stopy. Każdy przeto stopień straconego ciepła wytwarza siłę, wystarczającą na podniesienie 820 funtów na wysokość jednej stopy.

— — — — — — — — — — — — — — — — — —

Tych wyników nie można objaśnić, jeżeli ciepło jest substancją. Gdyby tak było, ta sama ilość ciepła byłaby pochłonięta przez rozrzedzanie, które zachodziło w doświadczeniach tablicy IV, jak ta, która się wywiązała przy odpowiedniem zgęszczeniu w doświadczeniach tablicy I; również pewna ilość zimna byłaby wytworzona w doświadczeniach, podanych w tablicy III. Wyniki te są jednak takiemi, jakie mogą być wyprowadzone a priori z teorji jakiejkolwiek, w której ciepło jest uważane, jako stan ruchu między cząsteczkami, tworzącemi ciało. Łatwo zrozumieć, w jaki sposób siła mechaniczna,

TABLICA IV.

Rodzaj doświadczenia	Ciśnienie barometryczne	Ilość powietrza zgęszczonego	Ilość powietrza wypuszczonego	Przeciętna temperatura pokoju	Różnica	Temperat. wody		Zysk lub strata ciepła
						przed doświadczeniem	po doświadczeniu	
Rozprężenie . . .	30.04	2862	2726	55,7	0.405+	56.207	55,004	0.203 straty
Dośw. sprawdz. . .				55,4	0.579+	56.004	55.954	0.050 „
Rozprężenie . . .	30.10	2807	2670	54,6	0.022+	54.714	54.530	0.184 „
Dośw. sprawdz. . .				54,25	0.276+	54.536	54.516	0.020 „
Rozprężenie . . .	30.10	2723	2587	53.6	0.760+	54.460	54.259	0.201 „
Dośw. sprawdz. . .				53,4	0.839+	54.259	54.219	0.040 „
Rozprężenie . . .	30.10	2807	2670	49,05	0.307+	49.456	49,258	0.198 „
Dośw. sprawdz. . .				49.1	0 158+	49.258	49.258	0
Rozprężenie . . .	30.23	3039	2903	50,6	0.508+	50.176	50.008	0.168 „
Dośw. sprawdz. . .				1,1	1.063—	50.017	50.057	0.040 „
Przec. z dośw. z rozprężeniem .	30.13	2859	2723		0.105+			0.1865 straty
Przec. z dośw. . . sprawdzających .					0.085+			0.0117 straty
Wynik popraw. . .	30.13	2859	2723					0.1738 straty

zużyta na zgęszczenie powietrza, może być udzielona tym cząsteczkom tak, żeby powiększyć prędkość ich ruchu, co może spowodować zjawisko podniesienia się temperatury. W doświadczeniach tablicy III zimno nie było wytworzone, ponieważ pęd tych cząsteczek nie przechodzi na stałe w siłę mechaniczną, ale gdyby ruch powietrza z jednego naczynia do drugiego doznawał oporu w ten sposób, iżby wytwarzał siłę na zewnątrz naczynia, co mogłoby być uskutecznione przy pomocy walca i tłoka, wtedy otrzymalibyśmy stratę ciepła, tak, jak w tablicy IV..., gdzie siła była użyta do podźwignięcia atmosfery ziemskiej.

Jest rzeczą zupełnie oczywistą, że przyczyna dla której ilość zimna w doświadczeniach tablicy IV była o tyle mniejsza od ilości ciepła, otrzymanego w doświadczeniach tablicy I, polega na tem, że cała siła powietrza poza tem, że była użyta na podniesienie atmosfery, była wydatkowana na przezwyciężenie oporu kranu, i że tam znowu zamieniała się napowrót w swój równoważnik cieplny.

Odkrycie D u l o n g a, że równe objętości wszystkich płynów sprężystych, wziętych w tej samej temperaturze i pod tem samem ciśnieniem, wywiązują lub pochłaniają tę samą bezwzględną ilość ciepła, gdy są nagle zgęszczone lub rozprężone o ten sam ułamek swej objętości, zgadza się doskonale z temi zasadami.

Mechaniczne równoważniki ciepła, wyznaczone w rozmaitych serjach doświadczeń, podanych w tej pracy, są równe 823, 795, 820, 814 i 760. Przeciętna z trzech ostatnich, które uważam za najmniej podległe błędom, wynosi 798 funtów[1]; wynik taki bliski 838 funtom, równoważnikowi, który wyprowadziłem z moich magnetycznych doświadczeń, że potwierdza w godny uwagi sposób wyżej przytoczone objaśnienie zjawisk, opisanych w tej pracy i że dostarcza nowego, według mnie, potężnego argumentu na korzyść dynamicznej teorji ciepła, która, stworzona przez B a c o n a, N e w t o n a i B o y l e'a, została następnie tak dobrze poparta przez doświadczenia R u m f o r d a, D a v y'ego i F o r b e s'a".

W 1847 r. pojawił się opis nowych doświadczeń J o u l e'a, w których podniesienie temperatury wody było wywołane przez tarcie wiatraczka, obracającego się w wodzie. Otrzymana wartość mechanicznego równoważnika ciepła wynosiła 430 Kgm/kal. Wprowadzenie pewnych poprawek do układu doświadczenia pozwoliło J o u l o'w i znaleźć w 1850 r. wartość, którą uważał za dokładniejszą, 423,55 Kgm/kal. Do tej samej metody powrócił J o u l e raz jeszcze w 1878 r., wprowadzając do niej zmiany, wskazane przez H i r n a. Naczynie z wiatraczkiem wisi prawie swobodnie, lekko tylko się opierając na trzech drewnianych podstawach, przymocowanych do innego naczynia, pływającego po wodzie. Do górnej części naczynia z wiatraczkiem przymocowane są dwa sznurki, przerzucone przez nieruchome bloki i obciążone na końcu szalkami, na których można kłaść ciężarki. Powstaje w ten sposób para sił, która stara się obrócić naczynie kalorymetryczne. Ruch obrotowy wiatraczka, poruszanego ręką, powoduje na skutek tarcia obrót kalorymetru w kierunku odwrotnym. Przez odpowiednie dobranie prędkości wiatraczka i wielkości zawieszonych ciężarów można utrzymać kalorymetr w spoczynku. Na tej drodze J o u l e otrzymał na mechaniczny równoważnik ciepła J wartość 423,852. Tę samą metodę, bez ulepszeń jednak, wprowadzonych przez J o u l e'a w 1878 r., stosowali F a v r e

[1]) To odpowiada 437,8 Kgm/kal.

(1858 r.), który otrzymał na J wartość 413,2, i H i r n (opis wszystkich doświadczeń H i r n a nad wyznaczeniem mechanicznego równoważnika ciepła został ogłoszony w 1862 r. w jego książce p. t. „Wykład analityczny i doświadczalny mechanicznej teorji ciepła" — Exposition analytique et expérimentale de la théorie mécanique de la chaleur), który znalazł J zawarte w granicach od 400 do 450 Kgm/kal. Szczególnie dokładne pomiary wykonał R o w l a n d (1879—1880), wprowadzając cały szereg poprawek do układu doświadczenia J o u l e'a i wykazując możliwe źródła błędu. R o w l a n d i następnie M i c u l e s c u (1892 r.) otrzymali wyniki prawie zgodne: 427,8 Kgm/kal. i 426,84 Kgm/kal. (przyczem temperatura wody wynosiła od 10 do 13° i wartość kilogramometra była sprowadzona do wartości, jaką ma w Paryżu). Podobnej metody użył jeszcze wcześniej P u l u j (1876 r.), który znalazł J=426,6. W roku 1867 J o u l e wyznaczył mechaniczny równoważnik ciepła z pomiarów ciepła, wywiązanego w przewodniku o znanym oporze, zanurzonym do kalorymetru, przez prąd o znanem natężeniu i otrzymał J=424,95 Kgm/kal. Tej metody użył przed nim Q u i n t u s I c i l i u s (1857 r.); pomiary jego były jednak niedokładne, gdyż wielkość oma, która w tem doświadczeniu ma ogromne znaczenie, nie była wtedy z dostateczną ścisłością ustalona. Sposób indukcji, użyty przez J o u l e'a w jego pierwszem doświadczeniu, został następnie zastosowany przez V i o l l e'a (1870 r.) i przez d'A r s o n v a l a (1891 r.). Wartości otrzymane wahały się w granicach od 421 (d'A r s o n v a l) do 437,4 (V i o l l e). Jak można sądzić z wykonanych w ciągu ostatnich trzydziestu lat pomiarów precyzyjnych (L e d u c, C a l l e n d a r i B a r n e s, D i e t e r i c i, S u t t o n - H e n n i n g i inni) najprawdopodobniejszą wartością J jest 426,9 Kgm/kal., wartość ustalona w pomiarach energji prądu elektrycznego przez J a e g e r a i S t e i n w e h r a (1915 r.).

Praca Helmholtza. — Od tych doświadczalnych prac J o u l e'a, wykonywanych z niesłabnącą energją w ciągu czterdziestu blisko lat i dążących stopniowo do podporządkowania zasadzie równoważności najrozmaitszych dziedzin zjawisk, różniła się całkowicie sposobem ujęcia zagadnienia wielka syntetyczna praca H e r m a n a H e l m h o l t z a, odczytana d. 23 czerwca 1847 r. na posiedzeniu Towarzystwa Fizycznego w Berlinie i nosząca tytuł „o zachowaniu siły" (Ueber die Erhaltung der Kraft).

HELMHOLTZ (Hermann, Ludwig, Ferdinand von Helmholtz) przyszedł na świat 31 sierpnia 1821 roku w Poczdamie. Jako dziecko był on naogół brzydki, słaby i chorowity. Pierwsze siedm lat swego życia przepędził w pokoju, rzadko kiedy wychodząc z domu; dość często nawet musiał dnie całe w łóżku przeleżeć. W tych warunkach, tak odmiennych od warunków życia dzieci zdrowych, wpływ rodziców, atmosfera domu rodzinnego szczególnie ważne miały znaczenie. Pod tym jednak względem mógł on być śmiało zaliczony do najszczęśliwszych dzieci. Ojciec jego August Helmholtz, podówczas nauczyciel gimnazjum w Poczdamie, należał w młodości do plejady młodych entuzjastów, których rewolucja francuska, wpływ poezji Schillera i Goethego raz na zawsze natchnęły pięknym filozoficznym i politycznym idealizmem. Wojny napoleońskie, które Niemcom wykazały dobitnie ich bezsilność, w młodzieży tej wzbudziły żywe uczucia patrjotyczne. Skupiona w Tugendbundach (związkach cnoty) młodzież ta szła w pierwszych szeregach armij sprzymierzonych walczyć za wolność Niemiec pod Lipskiem, Hanau, Paryżem. Po zdobyciu w 1814 r. przez sprzymierzeńców Paryża August Helmholtz wystąpił z wojska, dopełnił swych studjów filozoficznych i poświęcił się zawodowi nauczycielskiemu. Rzeczywistość jednak, z jaką się spotkał w zwycięskiej ojczyźnie po powrocie z wojny, nie odpowiadała nawet w najmniejszej mierze marzeniom młodych entuzjastów. W polityce zaczynał się coraz bardziej ujawniać złowrogi wpływ Świętego Przymierza, w nauczaniu ton nadawała ortodoksja protestancka, tłumiąca starannie wszelkie przejawy entuzjazmu i idealizmu, które przed upadkiem Napoleona takiem się nawet w kołach urzędowych cieszyły uznaniem. Na tem tle nastąpił wkrótce ostry konflikt między młodym nauczycielem a zwierzchnością szkolną. Ciężkie warunki materjalne zmusiły go do poddania się, trzeba było poniechać myśli o szerszej, bardziej owocnej działalności, z tym większym przeto zapałem zajął się on wychowaniem dzieci, a zwłaszcza najstarszego Hermana, w którym od chwili jego urodzenia cała rodzina wielkie pokładała nadzieje. Matka Helmholtza Karolina, z domu Penn, pochodząca po mieczu od sławnego angielskiego emigranta Williama Penna, po kądzieli zaś z hugonockiej rodziny Sauvage, była kobietą wyjątkowych zalet umysłu i serca.

Tego rodzaju atmosfera musiała z konieczności wywrzeć dobroczynny wpływ na młodego Helmholtza. Dzięki obcowaniu prawie ciągłemu z ojcem zżył się on od najmłodszych lat z najroz-

maitszemi dziedzinami ducha ludzkiego i zapoznał się stosunkowo bardzo wcześnie z wielkimi utworami poetów i filozofów.

Od wczesnej jednak młodości Helmholtz wykazywał zupełnie wyraźne skłonności i upodobania.

„Od bardzo wczesnego dzieciństwa, mówi o sobie Helmholtz w mowie wypowiedzianej w 70-letnią rocznicę swych urodzin[1]), namiętnie lubiłem czytać, co znacznie rozszerzało koło mych rozrywek; ale we wczesnem również dzieciństwie ujawnił się brak mego umysłu: słabo pamiętałem rzeczy, nie mające ze sobą związku. Przypominam sobie dokładnie, że trudno mi było odróżnić prawą rękę od lewej; również w szkole, gdy uczyłem się języków, sprawiało mi większą, niż innym uczniom, trudność zapamiętanie form gramatycznych, nieprawidłowych i szczególnych zwrotów... Lecz, gdy byłem w posiadaniu skromnych środków mnemotechnicznych takich, jak miara i rym w poezji, uczyłem się na pamięć i lepiej pamiętałem.

Pamiętałem z łatwością poezje wielkich mistrzów i o wiele gorzej wiersze, nieco wyszukane, autorów drugorzędnych... W wyższych klasach gimnazjum mogłem wypowiedzieć z pamięci kilka pieśni Odyssei, sporo od Horacego i wiele poezyj niemieckich... Człowiek lubi robić to, co jest dla niego łatwe. Z tego powodu byłem przedewszystkiem wielkim wielbicielem poezji. Tę skłonność podsycał we mnie mój ojciec...

W wyższych klasach gimnazjum uczył nas niemieckiego i czytał z nami Homera. Pod jego kierunkiem musieliśmy pisać ćwiczenia niemieckie prozą naprzemian z ćwiczeniami na metrykę — poezję, jakeśmy mówili. Większość z nas pozostała, bez wątpienia, miernymi poetami; nauczyliśmy się jednak, według mnie, lepiej, niż zapomocą jakiegokolwiek innego ćwiczenia wyrażać w sposób niesłychanie urozmaicony to, co mieliśmy do powiedzenia...

Najdoskonalszym jednak z istniejących sposobów mnemotechnicznych jest znajomość praw zjawisk. Przekonałem się o tem przedewszystkiem w geometrji. Moje oczy dziecka zapoznały mnie intuicyjnie, dzięki zabawie w budownictwo z drzewa, ze stosunkami przed-

---

[1]) Cytata w tekście wzięta jest z tłumaczenia francuskiego książki W. Ostwalda „Les grands hommes" traduit par le Dr. Marcel Dufour professeur agrégé à la Faculté de médecine de Nancy. Paris. Ernest Flammarion, str. 158 i nast. Dane biograficzne są poczerpnięte z książki Leo Koenigsbergera „Hermann von Helmholtz" Braunschweig. Vieweg und Sohn 1911.

miotów w przestrzeni. Bardzo dobrze wiedziałem, nie wiele się nad tem zastanawiając, w jaki sposób można zestawiać i dopasowywać ciała o postaci prawidłowej, gdy je obracałem w ten lub ów sposób. Gdy zaczynałem naukowo uczyć się geometrji, wszystkie fakty, których miałem się nauczyć, były mi, że tak powiem, bliskie i dobrze znane, ku wielkiemu zdziwieniu mych nauczycieli...

Jednej rzeczy tylko brak było geometrji: zajmowała się ona wyłącznie postaciami oderwanemi, ja zaś lubiłem rzeczywistość zupełną. Gdy byłem większy i silniejszy, przechadzałem się często z ojcem moim lub kolegami po pięknych okolicach Poczdamu i nauczyłem się kochać przyrodę. Pierwsze ułamki fizyki, których się nauczyłem w gimnazjum, zajmowały mnie o wiele więcej, niż nauka geometrji czystej i algebry. Przedmiot fizyki był bogaty i urozmaicony, zawierała ona całą pełnię i potęgę przyrody, która mogła być poddana pod władzę znanych praw. Istotnie, to co mnie przedewszystkiem pociągnęło, to opanowanie myślą, dzięki logicznej postaci prawa, przyrody, która stała początkowo przed nami, jak obca. Wkrótce jednak dowiedziałem się również, że znajomość praw zjawisk przyrodniczych jest talizmanem, którego posiadacz staje się panem przyrody...

Rzuciłem się bardzo gorliwie i z dużą radością na wszystkie książki fizyczne, które znalazłem w bibljotece mego ojca: były to dzieła bardzo przestarzałe, gdzie żył jeszcze flogiston i gdzie galwanizm nie przekroczył jeszcze stosu Volty. Starałem się również z innymi kolegami powtarzać rozmaitego rodzaju doświadczenia, o jakich czytaliśmy. Nauczyliśmy się gruntownie poznawać działania kwasów na zapasach tkanin naszych matek; co do reszty, to cieszyliśmy się miernem powodzeniem. Najlepiej udało się fabrykowanie narzędzi optycznych zapomocą szkieł od okularów, które można było dostać w Poczdamie, i małej lupy botanicznej mego ojca. Ponieważ środki moje były ograniczone, zmuszony byłem bardzo wcześnie nauczyć się zmieniać plan doświadczeń, które miały być wykonane, dopóki nie znalazłem postaci możliwej do urzeczywistnienia. Muszę się przyznać, że często, gdy klasa czytała Cicerona i Wirgiljusza, którzy mnie do najwyższego stopnia nudzili, obliczałem pod ławką bieg promieni świetlnych w teleskopie i w ten sposób znalazłem kilka twierdzeń z optyki, które były mi później przydatne przy budowie oftalmoskopu".

Temu zamiłowaniu do fizyki nie mógł jednak H e l m h o l t z odrazu zadosyć uczynić; warunki materjalne jego rodziny zmusiły go, po ukończeniu gimnazjum w Poczdamie, do wstąpienia na medycynę

do królewskiego medyko-chirurgicznego Instytutu w Berlinie. Było to pierwsze jego rozstanie się z domem rodzicielskim. Nic też dziwnego, że opanował go smutek i tęsknota, łagodzona nieco odwiedzaniem co niedziela Poczdamu i częstemi listami rodziców, nie skąpiących mu rad i otuchy. Wkrótce jednak, dzięki swej szczęśliwej naturze, pozwalającej mu łatwo przystosowywać się do zmienionych warunków, Helmholtz otrząsnął się z przygnębienia. Pierwszy rok pobytu w Instytucie upłynął mu na najrozmaitszych zajęciach: od zajęć anatomją przechodził do Homera i Byrona, od nich do Biota i Kanta. Grywał też dużo na fortepianie, gdyż, jak pisał w liście do rodziców, rzadko kiedy podobał mu się sposób odtwarzania dzieł muzycznych przez kogoś innego. Najbardziej może ulubionem jego zajęciem było jednak studjowanie dzieł wielkich matematyków: d'Alemberta, Lagrange'a, Laplace'a.

W następnych latach pochłonęły go bardziej studja specjalne. Zaczął bowiem słuchać wykładów fizjologji sławnego uczonego Johannesa Müllera, jednego z pionierów eksperymentalnego badania zjawisk fizjologicznych. Dla umysłu Helmholtza, wrogiego niejasnym hipotezom, przejętego krytycyzmem Kanta, twierdzenia dawnej szkoły witalistycznej o istnieniu pewnej siły życiowej, koordynującej wszystkie zjawiska fizyczne i chemiczne, zachodzące w ciele, były czemś nielogicznem, nie dającem się naukowo uzasadnić.

Wykłady Müllera, starającego się przyzwyczaić swych słuchaczów do opierania się na faktach, jeszcze bardziej utrwaliły w Helmholtzu i innych uczniach Müllera, — du Bois-Reymondzie, Virchowie, Brückem dążność do oparcia badań fizjologicznych na metodach fizyki i chemji oraz do zupełnego zerwania z witalizmem. Pod tym względem Helmholtz znacznie dalej poszedł, niż jego nauczyciel, który jeszcze w 1833 r. uznawał możliwość istnienia jednej siły życiowej „znającej wszystkie tajemnice sił fizyki i chemji, lecz znajdującej się z niemi w ciągłem starciu, jako przyczyny i najwyższej regulatorki wszystkich zjawisk"[1]. Ta podstawa życia — siła życiowa — znikała ze śmiercią organizmu, nie zostawiając po sobie żadnych śladów. Takie postawienie kwestji wydawało się Helmholtzowi niedopuszczalnem.

To też po ukończeniu i przedstawieniu w 1842 roku rozprawy dok-

[1]) A. Dastre „La vie et la mort". Paris. Ernest Flammarion. 1908, str. 18.

torskiej „De fabrica systematis nervosi Evertebratorum" Helmholtz przedsiębierze cały szereg prac, mających na celu zastosowanie ulubionych przez niego nauk ścisłych do niezwykle złożonych zjawisk życiowych. Jako asystent szpitala Charité w Berlinie, ogłasza w 1843 roku pracę o istocie gnicia i fermentacji, gdzie w pozornej sprzeczności ze swym mechanistycznym sposobem ujmowania zjawisk, lecz w zgodzie z zasadniczą dewizą „opierać wnioski naukowe na doświadczeniu", wyjaśnia rolę, jaką w tym procesie odgrywają mikroorganizmy. Ta pierwsza samodzielna praca zachęciła go do dalszych badań, które przeprowadził już w Poczdamie, wróciwszy znów do domu rodzicielskiego, jako lekarz pułku gwardji, konsystującego w Poczdamie. Z tych czasów zachowały się ciekawe opisy wrażenia, jakie na znajomych wywierał młody uczony. Wrażenie to miało być niezatarte: wyraz spokoju i uduchowienia, panujący na twarzy, plastyczny sposób mówienia, niezwykła zdolność obserwacyjna, która sprawiała, że, przestając z nim, zawsze można było dowiedzieć się czegoś nowego, wyróżniały go z pomiędzy innych młodych ludzi. Do tego dołączały się ogromne zalety towarzyskie: Helmholtz z zupełną łatwością przechodził od swych badań naukowych, od studjowania dzieła Jacobiego „Fundamenta nova functionum ellipticarum" do występowania w teatrze amatorskim, brania udziału w zbiorowych wycieczkach i t. d.

Poglądy jego na istotę procesów życiowych ujawniły się początkowo w pracy, ogłoszonej w 1845 r. „O zużyciu materji przy działaniu mięśni". Praca ta ustala związek, zachodzący między działaniem mięśni i wywiązanem wskutek tego ciepłem. Artykuł w encyklopedji nauk medycznych, który się wkrótce potem ukazał, p. t. „Ciepło, z punktu widzenia fizjologicznego" rozpatruje z ogólniejszego jeszcze punktu widzenia zjawiska cieplne, zachodzące w organizmach zwierzęcych. Pojmowanie ciepła, jako ruchu, rozpatrywanie wszystkich „sił przyrody", jako mogących wytwarzać w oznaczonym stosunku ciepło, jest zupełnie wyraźnie wypowiedziane w „sprawozdaniu z teorji fizjologicznych zjawisk cieplnych za rok 1845", które w 1847 r. ukazało się w świeżo założonem piśmie „Fortschritte der Physik". Ostatecznym wreszcie etapem na tej drodze, ujęciem w potężną syntezę wszystkich zjawisk energetycznych była praca „o zachowaniu siły", ogłoszona w 1847 roku. Sam Helmholtz, który, mówiąc nawiasem, nie docenił początkowo pracy Mayera i krzywdząco się o niej wyraził w sprawozdaniach towarzystwa fizycznego, dokładnie sobie zdawał sprawę ze znaczenia swej pracy. Inaczej jed-

nak sądzili jego przyjaciele-fizjolodzy, ludzie mało naogół znający mechanikę, dla których praca Helmholtza była istotnem objawieniem. Du Bois-Reymond nazwał ją „dokumentem historycznym wielkiej na wszystkie czasy naukowej koncepcji". Ta przesadna nieco ocena, gwałtownie wywalczająca dla Helmholza zaszczyt pierwszeństwa odkrycia i krzywdząca tym sposobem jego poprzedników, a zwłaszcza Mayera i Joule'a, wytworzyła niemiłą atmosferę drobnych intryg; kiedy bowiem znacznie później Dühring, broniąc Mayera, napadł, coprawda, bardzo gwałtownie na Helmholtza, przyjaciele jego dopuścili się niebywałego w dziejach uniwersyteckich czynu: pozbawili Dühringa, autora wielu cennych prac, między innemi pięknej „Historji mechaniki", prywat-docentury, jaką zajmował w uniwersytecie berlińskim. Należy podkreślić, że sam Helmholtz nie brał w tem czynnego udziału; przeciwnie, krzywdę, którą początkowo w zapale młodzieńczym wyrządził Mayerowi, starał się, o ile możności powetować: na zjeździe przyrodników w Insbruku w 1868 r. Helmholtz w przemówieniu swem wyraźnie i niedwuznacznie podkreślił znaczenie prac Mayera. Wcześniej jeszcze w 1854 r. w publicznym odczycie „O zmiennych działaniach sił natury" zaznaczył, że „pierwszym, który ujął i wyraził dokładnie omawiane prawo był lekarz niemiecki z Heilbronn, J. R. Mayer".

Wkrótce po wydaniu pracy „O zachowaniu siły" uwolnił się Helmholtz od obowiązków lekarza wojskowego, które mu ciążyły. Po kilku miesiącach wykładów anatomji w berlińskiej Akademji sztuk, został mianowany w 1849 r. nadzwyczajnym profesorem fizjologji w uniwersytecie Królewieckim. Nowe obowiązki pedagogiczne, jakie wziął na siebie, nie na długo odciągnęły go od pracy naukowej. Słuchaczów miał niewielu: początkowo zapisało się siedmiu, uczęszczało jednak na wykłady od trzech do pięciu. Laboratorjum, jakie zastał w Królewcu, nie było świetne, w dodatku kredyty były dość ograniczone. W pierwszym roku na potrzeby laboratorjum zdołał uzyskać tylko 100 talarów.

To mu jednak nie przeszkodziło przystąpić wreszcie do urzeczywistnienia dawno żywionych zamiarów opracowania podstaw fizjologji zmysłów. Praca, którą już w 1850 r. przesłał na ręce Du Bois-Reymonda do Berlina, o „prędkości rozchodzenia się podrażnień nerwowych", posiada istotnie olbrzymie znaczenie. Z pomiarów bowiem Helmholtza, ogłoszonych w tej pracy, wynikało, że prędkość rozchodzenia się podrażnień nerwowych, nie tylko nie jest

nieskończenie wielka, jak to przypuszczano podówczas, lecz naogół jest mała, o wiele mniejsza od prędkości głosu. Tego rodzaju wyniki, mające głębokie znaczenie filozoficzne i utrwalające metody nauk ścisłych w badaniu najbardziej złożonych zjawisk przyrody, wywołały, rzecz prosta, ogromne wrażenie, lecz naogół były przyjęte z niedowierzaniem, które bardzo powoli ustępowało.

W tym samym roku udało się Helmholtzowi dokonać wynalazku, mającego o wiele mniejsze znaczenie teoretyczne, lecz za to olbrzymią doniosłość praktyczną. Wynalazkiem tym był oftalmoskop, pozwalający, jak pisze Helmholtz do ojca, widzieć na dnie oka, „naczynia krwionośne, skrzyżowanie żył i tętnic, wejście nerwu ocznego do oka i t. d.".

Te pierwsze prace były jakby próbą sił młodego uczonego, który zwrócił się wkrótce do systematycznego badania wrażeń zmysłowych. Początkowo zajął się głównie fizjologją oka. Podczas pobytu w Królewcu powstały epokowe prace „o akomodacji oka", o „barwach dopełniających", o „istocie wrażeń zmysłowych u ludzi" i t. d.

W 1853 r. Helmholtz wyjechał dla odpoczynku do Anglji, gdzie zapoznał się z wszystkimi prawie wybitnymi uczonymi. W listach, które pisał z podróży do żony, zostały zachowane ciekawe uwagi Helmholtz'a o ludziach i stosunkach, z jakimi w Anglji się zapoznał.

„Udało mi się, pisze w jednym z listów, zobaczyć Faradaya, obecnie pierwszego fizyka Anglji i Europy... Były to dla mnie chwile wielkie i przyjemne. Jest on prosty, uprzejmy i skromny, jak dziecko; takiego chwytającego za serce sposobu zachowania się nie widziałem nigdy u żadnego człowieka. Pozatem był on nadzwyczaj uprzedzający. Pokazywał mi wszystko, co było do widzenia. Było tego jednak nie wiele, gdyż, jak się zdaje, kilka starych kawałków drzewa, drutu i żelaza wystarcza mu do największych odkryć".

Z późniejszym jednak swoim przyjacielem Williamem Thomsonem nie mógł się wówczas poznać. Znajomość ta nastąpiła znacznie później w 1855 r., kiedy Helmholtz jechał objąć katedrę anatomji w Bonn.

„Spodziewałem się, pisał później Helmholtz, że Thomson, jeden z najpierwszych fizyków matematycznych Europy, jest człowiekiem nieco starszym odemnie, byłem przeto nie mało zdziwiony, gdy na moje spotkanie wyszedł bardzo młodziutki człowiek, o jasnoblond włosach i o wyglądzie młodej panienki... Przewyższa on zresztą wszystkie naukowe wielkości, jakie osobiście poznałem,

bystrością, jasnością i ruchliwością umysłu, tak że miejscami sam wobec niego wyglądam na nieco tępego".

W Bonn działalność naukowa Helmholtza nie uległa żadnej zmianie. Długo opracowywana pierwsza część „optyki fizjologicznej" została tam przez niego ostatecznie wykończona i oddana do druku. Nie był to podręcznik w zwykłem znaczeniu tego wyrazu: sposób ujęcia przedmiotu, ugrupowanie materjału, a zwłaszcza cała masa nowych zupełnie faktów, oryginalnych doświadczeń, sumiennych pomiarów nadawały tej książce pierwszorzędne znaczenie. Druk następnych części posuwał się bardzo wolno tak, że całość, w której zostały uwzględnione późniejsze odkrycia Helmholtza, wyszła dopiero w 1866 roku. Na to opóźnienie wpłynęła jeszcze i ta okoliczność, że przedmiot badań Helmholtza coraz bardziej się rozszerzał: do badań optycznych dołączyły się wkrótce badania nad teorją dźwięku, do której Helmholtz przywiązywał wielką wagę ze względu na jej ścisły związek z muzyką.

„Ze wszystkich dziedzin, mówi on w cytowanej już przez nas mowie (patrz str. 281), w których pracowałem, najbardziej czułem się dyletantem w muzyce. Sztuka i nauka są pod wszystkiemi zewnętrznemi względami, jak również co do metody pracy, bardzo różnemi dla siebie dziedzinami; muszę jednak powiedzieć, że jestem przeświadczony o głębszem wewnętrznem powinowactwie nauki i sztuki. Sztuka również stara się nam głosić prawdy. prawdy psychologiczne, chociaż nie w postaci pojęć, lecz w zupełnie innej — zjawisk zmysłowych. Ostatecznie jednak w wykończonem zjawisku musi się również znaleźć ujęcie pojęciowe, i obadwa będą ostatecznie działały łącznie".

Badania te szybko posuwały się naprzód: odkrycie tonów kombinacyjnych, stwierdzenie zasadności prawa Ohma, wyjaśnienie fizycznej istoty samogłosek, wszystkie te pierwszorzędne badania przypadają na czas jego pobytu w Bonn.

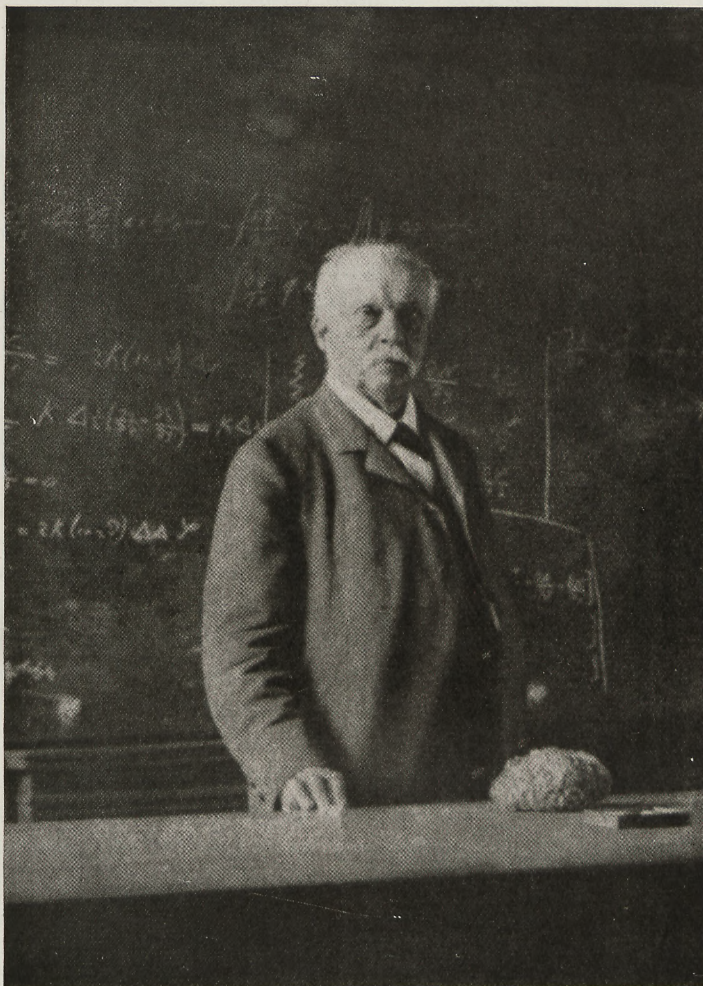
W 1858 roku otrzymał nominację na profesora fizjologji w Heidelbergu. Już na wyjezdnem wypowiedział w Bonn, ojczyźnie Beethovena, „najpotężniejszego z bohaterów sztuki tonów", mistrzowski odczyt o „fizjologicznych przyczynach harmonji muzycznej", w którym w sposób bardzo plastyczny wykazał różnicę między okiem i uchem. Oko nie odczuwa żadnej harmonji, pojmowanej w tym sensie, co harmonja dźwiękowa. Nie jest ono w stanie rozłożyć barwy złożonej na jej proste składniki, niema przeto muzyki oka.

„Zjawiska czysto zmysłowej harmonji są, bezwątpienia, najniższym stopniem muzycznego piękna. Dla wyższego duchowego piękna muzyki harmonja i dysharmonja są jedynie środkami, ale środkami zasadniczemi i potężnemi".

Z biegiem czasu badania te coraz bardziej wkraczały w dziedzinę fizyki. Ogłoszona w 1858 r. „teorja drgań powietrza w rurach otwartych" była jedną z najpoważniejszych prac fizyczno-matematycznych, jakie się podówczas ukazały. Wszystkie swoje badania z tej dziedziny ujął wreszcie Helmholtz w 1862 r. w jedną imponującą całość w dziele „nauka o wrażeniach dźwiękowych"; dzieło to posiada dla akustyki znaczenie epokowe (p. Akustyka).

W następnym roku Helmholtz po raz drugi pojechał do Anglji. Odwiedził, rzecz prosta, Faradaya, lecz tym razem odwiedziny te przykre po sobie zostawiły wspomnienie; Faraday był, jak zawsze, uprzejmy, ale czuć było zanik tej świetnej inteligencji; starość i upadek sił bardzo mu się dawały we znaki. Za to pobyt u Thomsona w Glasgowie zatarł te przykre wrażenia. Helmholtz spotkał się tam z bratem Williama, James'em, profesorem „of engineering" (inżynierji) w Belfaście.

„Jest to bardzo otwarta głowa, pisał Helmholtz do żony, z bardzo dobremi pomysłami, ale nie chce o niczem słyszeć i mówić, jak o „engineering", i mówi o tem ciągle, o wszystkich porach dnia i nocy tak, że w jego obecności nie można o niczem innem rozmawiać. Komiczną jest rzeczą, jak każdy z tych braci ciągle coś drugiemu wyjaśnia, przyczem jeden drugiego nie słucha i mówi o zupełnie różnych przedmiotach. Ale „engineer" jest upartszy i zazwyczaj swego dopnie... Oglądałem masę nowych i bardzo pomysłowych przyrządów i doświadczeń W. Thomsona... Tak jednak prędko on myśli, że trzeba dopiero przy pomocy całego szeregu pytań, na które trudno otrzymać od niego odpowiedź, wydobyć z niego potrzebne wskazówki co do budowy tych przyrządów... Jak go rozumieją jego studenci, nie pojmuję; zresztą w laboratorjum pracowało bardzo gorliwie sporo studentów, i, jak się zdaje, rozumieli o co chodzi... Przy doświadczeniach Thomsona stracił życie mój nowy kapelusz. Thomson wprawił w szybki ruch obrotowy ciężką płytę metalową, obracającą się na ostrzu; dla pokazania mi, jak dzięki obrotowi staje się ona nieruchliwą, uderzył ją młotem; płyta jednak wzięła mu to za złe, gdyż odleciała w jednym kierunku, zaś podstawa żelazna w drugim. Podstawa ta porwała mój kapelusz i rozpłatała go. Sama płyta szczęśliwie rozbiła tylko kilka szyb".



HERMANN von HELMHOLTZ

Wyd. „Mathesis Polska".



Po powrocie z Anglji Helmholtz zajął się ostatecznem opracowaniem swych badań fizjologicznych. Chodziło mu o wyjaśnienie, w jaki sposób nasze wrażenia zmysłowe odpowiadają otaczającej nas rzeczywistości, w jaki sposób budowa naszych organów zmysłów odbija się na ujmowaniu przez nas zjawisk świata zewnętrznego.

To zagadnienie oddawna zajmowało Helmholtza. Każdy bowiem badacz przyrody powinien, według niego, zdawać sobie sprawę nietylko z tego, jak działa jego galwanometr lub luneta i jaką dokładność dają mu one przy pomiarach, lecz także jakie są granice myśli ludzkiej i jak ta myśl pracuje. Wstęp do „zachowania siły" i późniejsze jego rozważania zasady przyczynowości były jakby pierwszym szkicem do teorji poznania, jaką w owym czasie Helmholtz rozwinął w dwu kapitalnych pracach „o danych spostrzegania" i „o faktach, stanowiących podstawę geometrji". Helmholtz przeczy twierdzeniu Johannesa Müllera, jakoby nasz przestrzenny sposób ujmowania zjawisk był czemś wrodzonem; przeciwnie, nasze wrażenia zmysłowe są jedynie znakami rzeczy i zjawisk zewnętrznych, uczymy się je pojmować przez doświadczenie i ćwiczenie. Zaczynamy rozumieć znaczenie znaków, gdy porównywamy je ze skutkami naszych ruchów i zmian, przez nas w świecie zewnętrznym wywołanych. Z tego punktu widzenia prawo przyczynowości, jak to już dawniej twierdził Helmholtz, jest jedynie hipotezą. Stanowisko jednak tej hipotezy względem innych hipotez jest wyjątkowe, jest ona bowiem podstawą, na której się opiera możność stosowania innych hipotez. Wbrew więc Kantowi, Helmholtz nie uważa prawa przyczynowości za twierdzenie aprioryczne. Ten brak cech transcendentalnych Helmholtz rozciąga nietylko na pojęcie przyczynowości, czasu i trójwymiarowości przestrzeni, lecz także na zasadnicze pewniki matematyki. Dla Helmholtza „pewniki geometrji... są w istocie rzeczy, twierdzeniami, sprawdzonemi przez obserwacje". Zwraca on uwagę, że możemy sobie wyraźnie wystawić tylko takie stosunki przestrzenne, które można wyobrazić sobie w istotnej przestrzeni; przestrzeni przeto o ilości wymiarów, większej od trzech, wystawić sobie nie możemy, gdyż wszystkie sposoby spostrzegania przy pomocy naszych zmysłów są ograniczone do trzech wymiarów przestrzeni.

Te dwie wyżej wspomniane prace, które wywarły wielki wpływ na „filozofję przyrody", rozpoczynały nowy okres w życiu Helmholtza, okres badań czysto fizycznych.

Już poprzednio w związku z pracami fizjologicznemi Helm-

holtz od czasu do czasu zajmował się opracowaniem pewnych zjawisk czysto fizycznych. Jeszcze będąc profesorem w Królewcu ogłosił on ciekawą rozprawę „o prądach elektrycznych w przewodnikach nielinjowych", w której, jeden z pierwszych, zastosował pojęcie potencjału, wprowadzone do nauki przez Gaussa. Następnie w 1857 r. ukazała się bardzo ważna praca Helmholtza „o całkach równań hydrodynamicznych, odpowiadających ruchom wirowym". Były to jednak prace dorywcze, w tym zaś okresie jego życia działalność jego staje się głębszą i rozleglejszą.

Początkowo zajmuje się on zagadnieniami, będącemi w ścisłym związku z poprzednio ogłoszonemi pracami z hydrodynamiki i elektryczności. Jeszcze w Heidelbergu ogłosił pracę „o nieciągłych ruchach cieczy". Wyniki, jakie otrzymał, pozwoliły mu dojść do ważnych uogólnień, dotyczących elektryczności i teorji funkcji potencjalnej.

W Berlinie, dokąd został w 1871 r. przeniesiony na katedrę fizyki, przeprowadza badania „nad prędkością rozchodzenia się działań elektrodynamicznych", mające bardzo ważne dla elektrodynamiki znaczenie. Za temi badaniami wkrótce następują inne, rozwijające teorję potencjału, wyprowadzające nowy wzór na działania elektrodynamiczne i rozpatrujące niesłychanie ważny wniosek z hipotezy Faradaya: istnienie prądów w przewodnikach otwartych. Badania te coraz bardziej przekonywały go o konieczności odrzucenia w zastosowaniu do zjawisk elektrycznych teorji działania na odległość i do przyjęcia teorji Faradaya. Doświadczalne sprawdzenie słuszności tego zagadnienia widział on w dokładnem zbadaniu zjawisk, zachodzących w prądach otwartych o bardzo wielkiej częstości. Tą myślą powodowany podał on w 1878 r. swoim słuchaczom, jako temat do pracy, zbadanie wielkości ekstraprądów. Temat ten podjął i opracował ulubiony uczeń Helmholtza młody Henryk Hertz (p. tom II, Elektryczność i Magnetyzm).

Hertzowi też powierza Helmholtz dalsze badania zjawisk elektrodynamicznych, sam zaś przystępuje do urzeczywistnienia ideału swego życia — ujęcia w syntezę mechaniczną zjawisk termodynamicznych. Praca nad tem zagadnieniem pochłania prawie całkowicie ostatnie lata życia Helmholtza. Pierwsza rozprawa, kładąca podwaliny pod ten nowy sposób ujmowania zjawisk termodynamicznych, pojawiła się w 1884 r. pod tyt. „statyka układów monocyklicznych", druga, dająca już całkowicie opracowaną teorję, wyszła w parę lat później p. t. „zasada najmniejszego działania".

W tym właśnie czasie, gdy powstawały te prace, umysł Helmholtza znajdował się w całej pełni rozwoju. Zdawało się, że ten przeszło sześćdziesięcioletni człowiek przeżywa drugą swą młodość; badania jego ogarniają wszystkie prawie dziedziny fizyki: bada on ruch ciał w płynach, wiry powietrzne i burze, kładzie podwaliny pod teorję dyspersji anomalnej, pomaga Wiedemannowi w redagowaniu Annalen der Physik i t. d. Szczególną jednak uwagę zwraca na badania Hertza; wiadomości o pomyślnych wynikach jego doświadczeń przejmują go żywą radością; wreszcie, gdy Hertz zawiadamia go, że udało mu się otrzymać fale elektromagnetyczne stojące, przesyła mu serdeczne powinszowanie i w liście do Du Bois-Reymonda pisze, że „praca Hertza jest zupełnie genjalna".

Zdrowie jednak coraz bardziej przestawało mu dopisywać. Bóle głowy, którym częściej zaczął podlegać, zmuszały go do coraz częstszego przerywania badań. Ciągła wytężona praca, rzecz prosta, nie wpływała na polepszenie tego stanu. W 1888 r. został Helmholtz mianowany przewodniczącym w świeżo założonym, dzięki hojności Wernera Siemensa, instytucie fizyczno-technicznym. Tym sposobem został on zwolniony od obowiązku wykładania i egzaminowania, co go zawsze najbardziej męczyło. Mimo to jednak stan jego zdrowia ciągle dużo pozostawiał do życzenia. Nie przeszkadzało to bynajmniej Helmholtzowi w dalszym ciągu prowadzić swoich badań. W końcu 1892 r. ogłasza on pracę wielkiej wagi: „o elektromagnetycznej teorji dyspersji barw", w 1893 r. „wnioski z teorji Maxwella co do ruchu w czystym eterze". Tę gorączkową pracę, której Helmholtz, przewidując rychły upadek sił, całkowicie się oddał, przerwała na czas pewien podróż do Ameryki, dokąd Helmholtz pojechał, jako przedstawiciel Niemiec na międzynarodowej wystawie w Chicago. W powrotnej drodze, wychodząc z kajuty, upadł ze schodów, zranił się w głowę i stracił bardzo dużo krwi. Wypadek ten podkopał jego siły. Do tego dołączyły się ciężkie przejścia osobiste, między innemi przedwczesna śmierć Hertza, którą Helmholtz boleśnie odczuł.

„Dla wszystkich, pisał Helmholtz, którzy przywykli upatrywać postęp ludzkości w możliwie szerokim rozwoju jej duchowych zdolności i w panowaniu ducha nad przyrodzonemi namiętnościami, jak również nad opornemi siłami przyrody, wiadomość o śmierci tego uprzywilejowanego ulubieńca genjusza była głęboko wstrząsającą... W starych klasycznych czasach powiedzianoby, że został on ofiarą zawiści bogów".

Siły Helmholtza słabły coraz bardziej. Nikt jednak nie oczekiwał tak rychłego końca. Jeszcze 14 czerwca 1894 r. Helmholtz złożył Akademji Berlińskiej pracę „o zasadzie najmniejszego działania w elektrodynamice". 8 września po krótkiej chorobie już nie żył.

Życie tego wyjątkowego genjusza daje rzadki przykład zadziwiającej harmonji wewnętrznej, pełni i radości życia. Ma się wrażenie, przeglądając jego prace, gdzie nic nie jest zostawione przypadkowi, gdzie jedno badanie wypływa logicznie z drugiego, że odkrywał on tajemnice natury z zupełną łatwością, bez żadnego wysiłku. Tak jednak nie było: w jednej ze swych prac Helmholtz porównywa się z wędrowcem, który dąży na szczyt górski uciążliwemi i krętemi drożynami i na szczycie dopiero spostrzega, że obok była wygodna droga, której nie zauważył. Często też, mówi on, rozwiązanie zagadnienia kazało długo na siebie czekać. Często zjawiało się zupełnie nagle, na przechadzkach lub po dłuższym odpoczynku umysłowym. Zawsze zjawiało się po uprzedniej długiej i ciężkiej pracy umysłowej.

„Samą jednak pracą nie można, mówi Helmholtz w prześlicznem przemówieniu na cześć Heidelberga, wydobyć tych myśli, przynoszących światło. Wyskakują one, jak Minerwa z głowy Jowisza, niespodziewanie, nieoczekiwanie; nie wiemy, skąd one przychodzą. To jedno jest pewne: temu, kto życie poznawał z książek i z papieru, i temu, kto jest zmęczony i zniechęcony jednostajną pracą, temu się one nie zjawiają. Musi on mieć poczucie pełni życia i siły, a to dają przedewszystkiem wędrówki w czystem powietrzu wyżyn. I gdy cichy spokój lasu odsuwa od wędrowca rozgwar świata, gdy jednem spojrzeniem ogarnia on bogate i bujne równiny z ich polami i wsiami, i gdy zachodzące słońce tka złote nici na dalekich górach, wtedy poruszają się... w ciemnych głębiach jego duszy zarodki nowych myśli, które mogą wnieść światło i ład do wewnętrznego świata wyobrażeń, gdzie przedtem był chaos i mrok".

Takim wędrowcem, czerpiącym swe natchnienia z bujnego życia przyrody, był genjusz Helmholtza.

Podobnie, jak pracę Mayera, rozprawę „o zachowaniu siły" rozpoczyna wykład tych założeń, których rozwinięciu i zastosowaniu do różnych gałęzi fizyki poświęcona jest dalsza jej część[1]).

---

[1]) Tłumaczenie według przedruku w „Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften" Nr. 1.

„Wywód postawionych [w rozprawie „o zachowaniu siły"] twierdzeń może być przedsięwzięty na podstawie dwojakiego rodzaju założeń: albo na podstawie twierdzenia, że jest rzeczą niemożliwą wytwarzać nieograniczenie zdolność pracy zapomocą wzajemnego oddziaływania jakiegokolwiek układu ciał przyrody lub też — zakładając, że wszystkie działania w przyrodzie dadzą się sprowadzić do sił przyciągających i odpychających, których natężenie zależy jedynie od odległości punktów, działających na siebie. Na początku samej rozprawy wykazałem, że obydwa te twierdzenia są identyczne".

Pierwsze z tych twierdzeń miało już, jak o tem wyżej niejednokrotnie była mowa, swoją dawną tradycję w rozważaniach fizycznych. Galileuszowi służyło do udowodnienia, że maszyny proste nie mogą stworzyć pracy, Stevinowi (p. Mechanika) do wyprowadzenia warunków równowagi na równi pochyłej, Huygensowi do ustalenia praw, rządzących ruchem wahadła złożonego; Carnot na niem oparł swoje twierdzenie. Mimo jednak tej niejednokrotnie wykazanej swej użyteczności było ono za każdym razem przyjmowane właściwie bez udowodnienia, jako rzecz sama przez się zrozumiała. To też zakres jej stosowania ulegał to zwężeniu, to rozszerzeniu: Huygens dopuszcza możliwość istnienia „perpetuum mobile" dla działań niemechanicznych, Leibniz zaś możliwości takiej zaprzecza, samo bowiem twierdzenie uważa za prosty wniosek z zasady przyczynowości; Carnot też uważa je za ogólnie obowiązujące, przyczem stwierdza, że zostało ono udowodnione dla działań wyłącznie mechanicznych. Pogląd ten już w końcu XVIII-go wieku staje się bardzo rozpowszechnionym: w 1775 r. Akademja Francuska ogłasza, że nie będzie więcej badała „żadnego rozwiązania zagadnień podwojenia sześcianu, podziału kąta na trzy części lub kwadratury koła, ani żadnej maszyny, ogłaszanej, jako ruch wieczny". Ten dekret jednak nie przeszkodził, że w początkach XIX-go wieku wielu widziało w t. zw. suchym stosie Zamboniego niewyczerpane źródło energji. Bezpośredniego dowodu słuszności twierdzenia o niemożliwości „perpetuum mobile" nie było; w żadnym razie dowodem takim nie mogło być niepowodzenie wielokrotnych prób zbudowania przyrządu, któryby dostarczał pracy w ilości nieograniczonej; z równą bowiem racją możnaby w tem widzieć jedynie brak odpowiednich uzdolnień lub pomysłowości u tych, którzy prób tych dokonywali. Istotne uzasadnienie, które sprawiało, że najwybitniejsi uczeni uznawali twierdzenie to za oczywiste, tkwiło w tem, co nazywano „zasadą przyczynowości", w stwierdzeniu,

tak znakomicie rozwiniętem przez M a y e r a, że nic nie może powstać z niczego — nihil ex nihilo fit.[1]). Tego uzasadnienia H e l m h o l t z nie odrzucał; przeciwnie, jak o tem przekonywa niżej pomieszczony ustęp rozprawy H e l m h o l t z a, nieraz się niem posługiwał; nie było ono jednak dla niego jedynem. Inne uzasadnienie, o wiele według H e l m h o l t z a ważniejsze, wypływało z założenia drugiego, określającego charakter sił, działających między ciałami. Z chwilą, gdy to założenie można udowodnić, niemożliwość „perpetuum mobile" staje się koniecznością; to zaś będzie dodatkowym dowodem słuszności założeń. W ten sposób jedno z tych twierdzeń uzasadnia drugie, obydwa są, według H e l m h o l t z a, nierozerwalnie ze sobą złączone. Dowodu pierwszego, możnaby powiedzieć, bezpośredniego szuka H e l m h o l t z w analizie zjawisk przyrody. „Zadaniem nauk fizycznych jest w pierwszym rzędzie szukanie praw, zapomocą których oddzielne zjawiska mogłyby być sprowadzone do ogólnych prawideł i z nich wyznaczone. Te prawidła, np. prawo załamania i odbicia światła, prawo M a r i o t t e'a i G a y - L u s s a c a, dotyczące objętości gazów, nie są, oczywiście, niczem innem, jak ogólnemi pojęciami gatunkowemi, które obejmują zespół należących tutaj zjawisk. Ich odnajdywanie jest przedmiotem doświadczalnej części naszej nauki. Część zaś teoretyczna stara się znów wykryć nieznane przyczyny zjawisk z ich widzialnych działań; stara się je ująć stosownie do praw przyczynowości. Jesteśmy zmuszeni i uprawnieni do zajmowania się tem na zasadzie podstawowego założenia, że każda zmiana w przyrodzie musi mieć dostateczną przyczynę. Najbliższe przyczyny, które przypisujemy zjawiskom natury, same muszą być albo niezmienne albo zmienne; w ostatnim przypadku to samo podstawowe założenie zmusza nas do szukania na nowo przyczyn tej zmiany, i to dopóty, dopóki wreszcie nie dojdziemy do ostatecznych przyczyn, działających według niezmiennego prawa, które przeto w tych samych zewnętrznych warunkach wywierają zawsze to samo działanie. Ostatecznym więc celem teorji nauk przyrodniczych jest znalezienie ostatnich niezmiennych przyczyn zjawisk przyrody. Czy zaś istotnie wszystkie zjawiska mogą być sprowadzone do takich przyczyn, czy więc natura musi być całkowicie dostępna naszemu pojmowaniu, lub też czy zachodzą w niej takie zmiany,

---

[1]) W 1865 r. pisał H i r n w swej „Teorji mechanicznej ciepła": „Nic z niczego, nic w nic, taka jest podstawa zasadnicza teorji mechanicznej, taki jest pewnik, którego nie przestanę stosować od początku do końca tej książki". (M a c h. Prin. d. Wärmelehre, str. 267).

które się wymykają z pod prawa koniecznej przyczynowości, które przeto należą do dziedziny samorzutności (spontaniczności), swobody, nie tu miejsce rozstrzygać; w każdym razie jest rzeczą jasną, że nauka, której celem jest zrozumienie natury, musi wychodzić z założenia możliwości jej ujęcia i, stosownie do tego założenia, wnioskować i badać, dopóki, być może, nie będzie zmuszona przez nieprzezwyciężone fakty do uznania swych granic.

Nauka rozważa przedmioty świata zewnętrznego w dwojakiem oderwaniu: naprzód tylko w ich istnieniu, bez zwracania uwagi na ich działania na inne przedmioty lub na nasze organy zmysłów; jako takie nazywa je m a t e r j ą.

Istnienie materji samej w sobie jest więc dla nas czemś obojętnem, pozbawionem działania; rozróżniamy w niej rozmieszczenie przestrzenne i ilość (masę), o której zakładamy, że jest wiecznie niezmienna. Jakościowych różnic nie możemy przypisać materji samej w sobie; gdyż, jeżeli mówimy o materjach różnego rodzaju, to wnioskujemy o ich różnorodności zawsze tylko na zasadzie różnorodności ich działań, t. zn. ich sił. Materja sama w sobie nie może wobec tego podlegać innym zmianom, jak tylko przestrzennym, t. zn. ruchowi. Przedmioty natury nie są jednak pozbawione działania, dochodzimy przecież głównie do ich poznania dzięki działaniom, które wywierają na nasze organy zmysłów, gdy z tych działań wnioskujemy o czynniku działającym. Jeżeli więc chcemy w rzeczywistości zastosować pojęcie materji, możemy to uczynić jedynie wtedy, gdy to pojęcie uzupełnimy drugiem pojęciem oderwanem, którego poprzednio nie braliśmy pod uwagę, mianowicie możnością wywierania działania, t. zn., gdy jej przypiszemy siły. Jest rzeczą jasną, że pojęcia materji i siły w zastosowaniu do natury nie powinny być nigdy oddzielane. Czysta materja byłaby dla pozostałej natury obojętna, gdyż nigdy nie mogłaby ona wywołać zmiany w naturze lub w naszych organach zmysłów; czysta siła byłaby czemś, co powinnoby istnieć, z drugiej zaś strony nie istnieć, gdyż to, co istnieje, nazywamy materją. Również błędnem jest chcieć uważać materję za coś rzeczywistego, siłę zaś tylko za pojęcie, któremu nic rzeczywistego nie odpowiada; obie są raczej oderwaniami rzeczywistości, utworzonemi w zupełnie jednakowy sposób; możemy przecież dostrzegać materję właśnie tylko dzięki jej siłom, nigdy zaś materji samej w sobie".

Pojęcie materji zatraca więc w ujęciu H e l m h o l t z a część tych cech fizycznych, jakie jej przypisywał M a y e r: ważkość i nieprze-

nikliwość; pozostają jedynie: rozmieszczenie przestrzenne i masa; jest ona pozatem całkowicie bierna fizycznie „nigdy nie mogłaby wywołać zmiany w naturze lub w naszych organach zmysłów". Dlatego też postulat, aby „zjawiska natury... [były]... sprowadzone do niezmiennych ostatecznych przyczyn", „wyraża się w ten sposób, że jako ostateczne przyczyny w czasie powinny być znalezione niezmienne siły". Cechy tych sił można ustalić w następującem rozumowaniu: „Materje o niezmiennych siłach (niezniszczalne jakości) nazwaliśmy w nauce pierwiastkami (chemicznemi). Wyobraźmy sobie jednak cały wszechświat rozłożony na pierwiastki o niezmiennych jakościach, to jedynemi jeszcze możliwemi zmianami takiego układu są zmiany przestrzenne, t. zn. ruchy, i zewnętrzne okoliczności, dzięki którym ulega zmianie działanie sił, mogą być tylko przestrzennemi; siły więc mogą być tylko siłami ruchu, zależnemi w swem działaniu jedynie od stosunków przestrzennych. Ściślejsze przeto określenie będzie takie: zjawiska natury powinny być sprowadzone do ruchów materji o niezmiennych siłach ruchu, zależnych jedynie od stosunków przestrzennych".

A więc, wyrażone innemi słowami, w treści swej o wiele bardziej pogłębione, w sformułowaniu ściślejsze—założenia Helmholtza sprowadzają się do twierdzenia, które Descartes uważał za główną bodaj podstawę swej fizyki „...każda zmiana materji lub wszystka różnorodność jej postaci zależy od ruchu"[1]). Descartes, coprawda, szedł dalej, niż Helmholtz, masa, która była dla niego zresztą pojęciem całkowicie nieznanem, nie była cechą charakterystyczną materji, „prawdziwa istota ciał polega jedynie na rozciągłości". Na takie uogólnienie mechanika Newtonowska nie pozwalała; Helmholtz zachował zasadnicze jej pojęcia, masę i siłę, rozszerzył je tylko na wszystkie zjawiska fizyczne, uczynił je dla wszystkich dziedzin fizyki obowiązującemi. Więcej nawet, dalsze rozważania doprowadzają go do wniosku, że siły, z jakiemi na siebie działają dwie masy, muszą być t. zw. siłami środkowemi, których najdoskonalszym pierwowzorem są Newtonowskie siły grawitacyjne.

„Ruch jest zmianą stosunków przestrzennych. Stosunki przestrzenne są możliwe jedynie względem ograniczonych części przestrzeni, lecz nie względem przestrzeni próżnej, pozbawionej różnic. Dlatego też w doświadczeniu ruch może się odbywać jedynie, jako zmiana wzajemnych stosunków przestrzennych przynajmniej dwu ciał ma-

---

[1]) „Omnis materiae variatio sive omnium eius formarum diversitas pendet a motu". (Principia philosophiae).

terjalnych; siła poruszająca, jako przyczyna ruchu, może być również uważana tylko dla wzajemnego stosunku przynajmniej dwu ciał; należy ją przeto określić, jako dążenie dwu mas do zmiany wzajemnego położenia. Siła jednak, którą wywierają na siebie dwie całkowite masy, musi być rozłożona na wzajemnie działające siły wszystkich ich części; dlatego też mechanika powraca do sił punktów materjalnych, t. zn. punktów przestrzeni, wypełnionych materją. Punkty jednak, poza swą odległością, nie mają żadnego innego związku przestrzennego, gdyż kierunek łączącej je prostej może być wyznaczony tylko w stosunku do dwu przynajmniej innych punktów. Siła poruszająca, którą punkty wywierają na siebie wzajemnie, może być przeto li-tylko przyczyną zmiany ich odległości, t. zn. — przyciągająca lub odpychająca. To wynika również z zasady dostatecznej przyczyny. Siły, jakiemi działają na siebie dwie masy, muszą być z konieczności oznaczone co do wielkości i kierunku, skoro jest całkowicie dane położenie mas. Dwa jednak punkty wyznaczają całkowicie tylko jeden kierunek, mianowicie kierunek łączącej je prostej; wskutek tego siły, które one wzajemnie wywierają, muszą mieć kierunek tej prostej, i natężenie ich może zależeć jedynie od odległości. Ostateczne więc zadanie nauk fizycznych wyraża się w ten sposób, że mają one sprowadzić zjawiska natury do niezmiennych przyciągających i odpychających sił, których natężenie zależy od odległości".

Wystarczy porównać to określenie zadań nauk fizycznych z określeniem przez C a r n o t a cech teorji zupełnej, jakiej wzorem jest dla C a r n o t a mechanika, w której „wszystkie przypadki są przewidziane, wszystkie możliwe ruchy poddane zasadom ogólnym, gruntownie ustalonym i mającym zastosowanie we wszelkich okolicznościach", ażeby stwierdzić, o ile dalej H e l m h o l t z odsuwał cel badań fizyki i jak „teorja zupełna" C a r n o t a jest dla niego tylko jednym z etapów „całkowitego ujęcia natury". Bardziej dla niego zrozumiałem i bardziej możliwem do przyjęcia byłoby bodaj stanowisko D e s c a r t e s'a:

„Gdy są znalezione zasady rzeczy materjalnych, które są nie przez złudzenia zmysłów, lecz przez światło rozumu tak ustalone, że nie możemy wątpić w ich prawdziwość, należy zbadać, czy przy ich jedynie pomocy nie będziemy mogli wytłumaczyć wszystkich zjawisk przyrody" [1]).

---

[1]) Inventis iam quibusdam principiis rerum materialium, quae non a praeiudicis sensuum, sed a lumine rationis ita petita sunt ut de ipsorum veritate dubitare nequaeamus, examinandum est, an ex iis solis omnia naturae phenomena possimus explicare". (Princ. phil.).

Otóż „możliwość rozwiązania tego zadania [wyżej sformułowanego przez Helmholtza] jest równocześnie warunkiem możliwości całkowitego ujęcia przyrody. Mechanika analityczna nie przyjęła dotychczas tego ograniczenia pojęcia siły poruszającej; przedewszystkiem dlatego, że nie zdawała ona sobie jasno sprawy z pochodzenia swych podstawowych założeń, następnie zaś, że chodzi jej o obliczenie skutku oddziaływania złożonych sił poruszających w tych przypadkach, gdzie jeszcze się nie udał rozkład ich na siły proste. Wielka jednak część jej ogólnych zasad ruchu złożonych układów mas obowiązuje tylko w tym przypadku, gdy masy te działają na siebie niezmiennemi przyciągającemi lub odpychającemi siłami... W stosunkach ziemskich z zasad tych tylko dwie [zasada prędkości przygotowanej i zasada zachowania siły żywej] znajdują głównie zastosowanie, gdyż inne dotyczą jedynie zupełnie swobodnych układów; pierwsza znów jest, jak to wykażemy, szczególnym przypadkiem ostatniej, która przeto wydaje się najogólniejszym i najważniejszym wnioskiem z wywodów, przez nas podanych". I dla tem silniejszego podkreślenia swego stanowiska powtarza jeszcze raz H e l m h o l t z w zakończeniu wstępnego rozdziału swej rozprawy:

„Teoretyczna nauka przyrody musi zatem, o ile nie chce się zatrzymać w połowie drogi pojmowania, pogodzić swoje poglądy z postawionemi wymaganiami co do istoty sił prostych i z wypływającemi z nich wnioskami. Zadanie jej będzie spełnione, gdy kiedykolwiek spełni się sprowadzenie zjawisk do sił prostych i gdy jednocześnie będzie udowodnione, że dane sprowadzenie jest jedynem, na jakie pozwalają zjawiska. Wtedy będzie wykazane, że jest ono konieczną postacią ujmowania przyrody (Begriffsform der Naturauffassung), i trzeba je będzie wskutek tego uznać za objektywną prawdę".

Wobec tego należy zbadać dokładnie te „wymagania" i te wnioski przedewszystkiem w zjawiskach mechanicznych; tam bowiem najłatwiej mogą one ulec zbadaniu, stąd najprościej będzie uogólnić je na inne zjawiska. To też w rozdziale I rozprawy o „zachowaniu siły" H e l m h o l t z przechodzi do rozważań nad działaniami mechanicznemi, przyczem pojęcie siły, którego we wstępie H e l m h o l t z używa zazwyczaj w znaczeniu, przyjętem przez N e w t o n a, doznaje znacznego rozszerzenia i służy, podobnie jak u M a y e r a, do oznaczania i tej wielkości, którą dzisiaj nazywamy pracą lub energją mechaniczną.

„Wychodzimy z założenia, że jest rzeczą niemożliwą przy jakim-

kolwiek układzie ciał natury stale wytwarzać z niczego siłę. Z tego założenia już Carnot i Clapeyron[1]) wyprowadzili teoretycznie szereg częściowo znanych, częściowo jeszcze nie wykazanych doświadczalnie praw, tyczących się ciepła właściwego i utajonego różnych ciał natury. Celem niniejszej rozprawy jest przeprowadzenie zupełnie w ten sam sposób pomienionej zasady przez wszystkie gałęzie fizyki; poczęści, aby wykazać możliwość stosowania jej w tych wszystkich przypadkach, gdzie prawa zjawisk są już dostatecznie zbadane, poczęści, aby z jej pomocą na zasadzie wielostronnych analogij z faktami bardziej znanemi wyciągnąć dalsze wnioski co do zjawisk, dotychczas dostatecznie niezbadanych, i tym sposobem dać nić przewodnią doświadczeniu.

Wspomniana zasada może być przedstawiona w sposób następujący. Wyobraźmy sobie układ ciał przyrody, które znajdują się między sobą w pewnych przestrzennych stosunkach i są wprawiane w ruch przez swe siły wzajemne, dopóki nie przejdą do innego oznaczonego położenia: możemy wtedy nabyte przez nie prędkości uważać za pewną pracę mechaniczną i zamienić je w nią. Jeżeli teraz chcemy sprawić, aby te siły były czynne po raz drugi, dla otrzymania tej samej pracy ponownie, musimy ciała znów doprowadzić jakimkolwiek sposobem do początkowych warunków przez zastosowanie innych sił, będących w naszem rozporządzeniu; na to więc zużyjemy znowu pewną wielkość pracy tych sił. Otóż, w tym przypadku nasza zasada wymaga, aby wielkość pracy otrzymanej, gdy ciała układu przechodzą z położenia początkowego do innego, i zużytej, gdy z tego przechodzą z powrotem do początkowego, była stale taka sama, jakimkolwiek byłby sposób, droga lub prędkość tego przejścia. Gdyby bowiem na jakiejś drodze była ona większa, niż na innej, to moglibyśmy użyć drogi pierwszej do otrzymania pracy, drugiej do sprowadzenia do stanu pierwotnego; na to zaś moglibyśmy zużyć część tak otrzymanej pracy i tym sposobem wytwarzalibyśmy do nieskończoności siłę mechaniczną, zbudowalibyśmy perpetuum mobile, które nie tylko zachowałoby swój własny ruch, lecz jeszcze byłoby w stanie oddawać siłę nazewnątrz.

Jeżeli będziemy szukali matematycznego wyrażenia tej zasady, to znajdziemy je w znanem prawie zachowania siły żywej. Wielkość pracy, otrzymanej i zużytej, może być, jak wiadomo, wyrażona, jako ciężar m, podniesiony na oznaczoną wysokość h; jest ona wówczas

[1]) Poggendorff's Annalen LIX, 446, 556.

mgh, gdzie g jest natężeniem siły ciężkości. Dla prostopadłego swobodnego wzniesienia się na wysokość h ciało m wymaga prędkości $v = \sqrt{2gh}$ i nabywa jej znów przy spadaniu. Jest więc $\frac{1}{2}mv^2 = mgh$; wskutek tego połowa iloczynu mv^2, który w mechanice nazywamy, jak wiadomo, „ilością siły żywej ciała m", może być postawiona zamiast miary wielkości pracy. Dla lepszego uzgodnienia z używanym obecnie sposobem mierzenia natężenia sił proponuję również wielkość $\frac{1}{2}mv^2$ oznaczać jako ilość siły żywej, dzięki czemu stanie się ona identyczną z miarą wielkości pracy [1]). Dla dotychczasowego stosowania pojęcia siły żywej, która ogranicza się tylko do omawianej zasady, zmiana ta jest bez znaczenia, nam jednak w następnych naszych wywodach zmiana ta zapewnia istotne korzyści".

Jeżeli te założenia, które zresztą nowością w mechanice nie były, uznamy za słuszne, to wtedy z zasady zachowania siły żywej wyniknie bezpośrednio udowodnienie niemożliwości perpetuum mobile dla wszystkich przypadków, w których zasada ta obowiązuje. Zasadę tę bowiem można sformułować w sposób następujący: „gdy dowolna ilość ruchomych punktów materjalnych porusza się pod wpływem takich jedynie sił, któremi działają wzajemnie na siebie punkty materjalne, lub które skierowane są ku stałym środkom, wtedy suma sił żywych wszystkich razem wziętych punktów materjalnych ma wartość tę samą we wszystkich momentach czasu, w których wszystkie punkty zajmują to samo położenie względem siebie i względem stałych środków, jakąkolwiek by była droga i prędkość w momentach pośrednich".

Sprowadzenie więc układu do stanu początkowego zużyje tyleż pracy, ile można jej było otrzymać ze zmiany tego stanu, gdyż każdy przyrost lub ubytek siły żywej jest miarą wykonanej lub zużytej pracy. „Ta jednak zasada nie obowiązuje wszystkich możliwych rodzajów sił" i „może być udowodniona jedynie dla punktów materjalnych, działających na siebie siłami przyciągającemi i odpychającemi". Helmholtz zakłada, że jest ona słuszna wyłącznie w tym tylko przypadku, gdy „siły działające można rozłożyć na siły punktów materjalnych, które działają w kierunku łączącej te punkty linji, i których natężenie jest zależne tylko od odległości; w mechanice tego rodzaju siły są zazwyczaj nazywane siłami środkowemi" i wykazuje, że istotnie takie założenie wynika bezpośrednio z zasad me-

---

[1]) Już przedtem poprawkę tę wprowadził Coriolis.

chaniki Newtonowskiej. Te rozważania doprowadzają go do nowego sformułowania zasady zachowania.

Rozpatrzmy przypadek najprostszy — dwu punktów materjalnych, przyciągających się wzajemnie. Gdy punkty będą się do siebie zbliżały, siła żywa każdego z nich będzie wzrastała kosztem wykonanej przez każdą z sił działających pracy; gdy będą się oddalały, siła żywa będzie się zużywała na pokonanie oporu sił przyciągających. Helmholtz przyjmuje, że w pierwszym przypadku zmniejsza się pewna wielkość, którą nazywa „siłą napięcia" (Spannkraft). Zmniejszenie jej równe jest zużytej pracy lub, używając terminologji Helmholtza, odpowiedniej sumie sił napięcia. Niech odległość między danemi punktami zmniejszy się od *r* do *R*, wtedy pozostanie jeszcze pewna „suma sił napięcia" równa co do wartości bezwzględnej pracy, którąby wykonały siły, przybliżając dane punkty z odległości *R* do zupełnego zetknięcia. W przypadku drugim „ilość siły napięcia" wzrasta. Największą wartość osiągnie, rzecz prosta, wtedy, gdy wzajemna odległość punktów będzie nieskończenie wielka. Wtedy całkowita „suma sił napięcia" będzie równa temu przyrostowi sił żywych, jakiby towarzyszył przybliżaniu się punktów z nieskończoności do odległości zero. „Suma zatem zawartych sił żywych i sił napięcia jest zawsze stała". Uogólnienie na układ o dowolnej ilości punktów materjalnych nie nastręcza żadnych szczególnych trudności, wobec czego można stwierdzić, że w każdym układzie odosobnionym, t. zn. nie podlegającym żadnym działaniom ze strony ciał nienależących do układu, obowiązuje zasada „zachowania siły", o ile tylko „ciała [wchodzące do układu] działają na siebie wzajemnie siłami przyciągającemi lub odpychającemi, niezależnie od czasu i prędkości". W tem sformułowaniu zasada „zachowania siły żywej" nabiera cech uderzającej analogji z zasadą „zachowania masy" i staje się tem samem bardziej zrozumiałą, a nawet prawie oczywistą

Ale w myśl założeń, wyjaśnionych we wstępie, wszystkie zjawiska natury powinny być sprowadzone do „sił przyciągających i odpychających", zasada więc „zachowania siły" staje się ogólną zasadą, której podlegają wszystkie zjawiska fizyczne. Wystarczy obliczyć dla danego układu odosobnionego całkowitą sumę sił żywych i „sił napięcia" aby stwierdzić, że bez względu na to, jakich zjawisk jest dany układ siedliskiem, suma „sił" pozostaje wielkością stałą, niezależną od czasu. Trudność jednak polega na tem, że dane, jakie możemy otrzymać na drodze doświadczalnej zazwyczaj nie pozwalają na bezpośrednie obliczenie sumy każdego rodzaju „siły"; rzeczą

przeto dalszych badań jest ustalenie, jaka z wielkości, dostępnych naszym pomiarom, jest odpowiednikiem danych wielkości mechanicznych i jaka jest jej „miara" mechaniczna, jej mechaniczny — siłowy — równoważnik. Do tego badania przystępuje Helmholtz w dalszej częśc swej rozprawy, przechodząc stopniowo od zjawisk mechanicznych poprzez zjawiska cieplne do zjawisk elektrycznych i magnetycznych.

Zastosowanie zasady w twierdzeniach mechanicznych.

„Przechodzimy obecnie do poszczególnych zastosowań prawa stałości siły. Przedewszystkiem musimy w krótkości wspomnieć o tych przypadkach, w których zasada zachowania siły żywej była już dotychczas używana i uznawana.

1) Wszystkie ruchy, które się odbywają pod wpływem siły ciążenia powszechnego, a więc ruchy ciał niebieskich i ciężkich ciał ziemskich. Dla pierwszych ciał prawo znajduje swój wyraz w przyroście ich prędkości, gdy po swym torze zbliżają się do ciała środkowego, w niezmienności wielkiej osi toru, czasu obiegu i obrotu; dla drugich w znanem prawie, że prędkość końcowa spadku zależy jedynie od wysokości spadku, nie zaś od kierunku i postaci przebieżonej drogi, i że prędkość ta, o ile nie jest zniweczona przez tarcie lub uderzenie niesprężyste, dokładnie wystarcza, aby podnieść ciało, które upadło, na tę samą wysokość, z której spadło. Wspomniałem już o tem, że wysokość spadku oznaczonego ciężaru jest używana, jako miara wielkości pracy naszych maszyn.

2) Przenoszenie ruchu przez nieściśliwe ciała stałe i płynne, gdy nie zachodzi ani tarcie ani uderzenie ciał niesprężystych. Naszą zasadę ogólną wyraża się w tym przypadku zazwyczaj, jako prawidło, że ruch przenoszony i przeistaczany przez potęgi mechaniczne stale zmniejsza się co do natężenia siły w takim stosunku, w jakim wzrasta co do prędkości. Wyobraźmy więc sobie ciężar m, podnoszony z prędkością c przez maszynę, w której jakimkolwiek sposobem jest wytwarzana równomierna siła pracy, to zapomocą innego mechanicznego urządzenia może być podniesiony ciężar nm, ale tylko z prędkością $\frac{c}{n}$, tak, że w obydwu przypadkach ilość wytworzonej przez maszynę w jednostce czasu siły

napięcia może być przedstawiona przez *mgc*, gdzie *g* oznacza natężenie siły ciężkości.

3) Ruchy ciał stałych i ciekłych doskonale sprężystych. Jako warunek doskonałej prężystości, musimy do zazwyczaj stawianego warunku, żeby ciało, którego kształt lub objętość zmieniamy, ponownie całkowicie przybierało ten sam kształt i objętość, dodać jeszcze jeden, żeby w jego wnętrzu nie było żadnego tarcia cząsteczek. Przy rozważaniu tych ruchów zasada nasza najwcześniej została poznana i najczęściej była stosowana. Jako najzwyklejsze przypadki stosowania jej do ciał stałych należy wymienić uderzenie sprężyste, którego prawa łatwo można wyprowadzić z naszej zasady i z zasady zachowania środka ciężkości, i różnorodne drgania sprężyste, które też trwają bez nowego bodźca, dopóki nie będą zniszczone przez tarcie wewnętrzne i przez przekazanie ruchu środowisku zewnętrznemu. W ciałach płynnych, zarówno ciekłych (oczywiście też sprężystych, lecz posiadających bardzo wysoki moduł sprężystości i o cząsteczkach w położeniu równowagi) jak również gazowych (o niższym module sprężystości i bez położenia równowagi) wszystkie naogół ruchy przy swem rozchodzeniu się występują pod postacią fal. Tutaj należą fale powierzchni cieczy, ruch dźwięku i prawdopodobnie ruch światła i ciepła promienistego.

Siła żywa pojedyńczej cząsteczki Δm w środowisku, przez które przebiega szereg fal, jest oczywiście wyznaczona przez prędkość, którą cząsteczka posiada w swem położeniu równowagi. Ogólne równanie falowe wyznacza, jak wiadomo, prędkość u w sposób następujący:

$$u = a \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} (x - \alpha t) \right],$$

gdzie a^2 jest natężeniem, λ — długością fali, α — prędkością rozchodzenia się, x—odciętą, t—czasem. W położeniu przeto równowagi $u=a$, siła żywa cząsteczki Δm jest podczas ruchu falowego równa $\frac{1}{2}\Delta m . a^2$, — proporcjonalna do natężenia. Jeżeli fale rozchodzą się kulisto ze środka, to wprawiają w ruch coraz to większe masy, natężenie przeto musi się zmniejszać, jeżeli siła żywa ma pozostać taką samą. Otóż, stąd, że masy, ogarniane przez ruch falowy, powiększają się, jak kwadraty odległości, wynika znane prawo, że natężenia zmniejszają się w stosunku odwrotnym.

Prawa odbicia, załamania i polaryzacji światła na granicy dwu środowisk o różnej prędkości fal zostały już, jak wiadomo, wypro-

wadzone przez F r e s n e l a z założenia, że ruch cząstek granicznych w obydwu środowiskach jest ten sam oraz z zasady zachowania siły żywej. Przy interferencji dwu szeregów fal nie zachodzi żadne zniszczenie siły żywej, lecz tylko inny jej rozkład. Dwa szeregi fal o natężeniu a^2 i b^2, które nie interferują, udzielają wszystkim napotkanym punktom natężenia a^2+b^2; jeżeli interferują, to mają maxima $(a+b)^2$ o $2ab$ większe, minima $(a-b)^2$ o tyleż mniejsze, niż a^2+b^2. Siła żywa fal sprężystych jest zniweczona dopiero przy takich procesach, które nazywamy ich absorbcją. Absorbcję fal głosowych otrzymujemy głównie przez uderzenie ich o poddające się ciała niesprężyste np. zasłony, kołdry, musimy więc ją uważać w zasadzie za przejście ruchu do napotykanych ciał i zniweczenie go w nich przez tarcie; czy ruch może być też zniweczony przez wzajemne tarcie cząsteczek powietrza, tego jeszcze nie możnaby rozstrzygnąć. Pochłanianiu promieni cieplnych towarzyszy proporcjonalne wywiązywanie się ciepła; o ile to ostatnie odpowiada pewnemu równoważnikowi siłowemu, będziemy mówili w najbliższym rozdziale. Zachowanie siły powinno zachodzić, jeżeli tyleż ciepła, ile znika w ciele promieniującem, na nowo się pojawia w opromieniowanem, w założeniu, że nie zachodzi żadne odprowadzanie go i że żadna część promieniowania nie dochodzi gdzieindziej. Twierdzenie to jest dotychczas przyjmowane zgóry przy badaniach nad promieniowaniem cieplnem, nie są mi jednak znane żadne badania przeprowadzane dla jego uzasadnienia. Przy pochłanianiu promieni świetlnych przez niezupełnie lub całkowicie nieprzezroczyste ciała znamy trojakiego rodzaju zjawiska. Przedewszystkiem ciała fosforyzujące pobierają światło w ten sposób, że następnie mogą je znowu wysyłać, jako światło. Po druge, większość, a być może wszystkie promienie świetlne wzbudzają, jak się zdaje, ciepło. Uznawanie tożsamości promieni widma cieplnych, świetlnych i chemicznych w nowszych czasach coraz mniej napotyka przeszkód [1]), zdaje się tylko, że równoważnik cieplny promieni chemicznych i świetlnych jest niesłychanie mały w porównaniu z ich intensywnem działaniem na oko. Jeżeliby jednak jednorodność różnych działających promieniowań nie została potwierdzona, musielibyśmy uznać kres ruchu światła za nieznany. Po trzecie, w wielu przypadkach światło pochłaniane wzbudza działanie chemiczne. Musimy tutaj pod względem stosunku sił rozróżniać dwa

---

[1]) M e l l o n i w Pogg. Ann. Tom. LVII, str. 300. B r ü c k e w Ann. Tom LXV, str. 593.

rodzaje takiego działania; po pierwsze takie, gdzie światło pobudza jedynie do działalności powinowactwa chemicznego, podobnie do ciał, działających katalitycznie; po drugie, takie, gdzie światło działa przeciwko powinowactwu chemicznemu, np. przy rozkładzie soli srebra, przy działaniu na zielone części roślin. W większości jednak tych zjawisk skutki działania światła są jeszcze tak mało znane, że nic nie możemy sądzić o wielkości sił, biorących w tem udział.

Równoważnik siłowy ciepła.

Temi procesami mechanicznemi, w których przyjmowano dotychczas bezwzględną stratę sił, są:

1) Uderzenie się ciał niesprężystych. To zjawisko jest po większej części połączone ze zmianą postaci i ze zgęszczeniem uderzających się ciał, a więc ze zwiększeniem sił napięcia; następnie przy często powtarzanych tego rodzaju uderzeniach znajdujemy znaczne wywiązywanie się ciepła; np. przy kuciu kawałka metalu; wreszcie część ruchu jest oddana, jako dźwięk, sąsiednim ciałom stałym i lotnym.

2) Tarcie zarówno na powierzchniach dwu ciał, poruszających się jedno po drugiem, jako też i wewnątrz ciał przy zmianach postaci, wywołanych przez wzajemne przesunięcie się mniejszych cząstek. Również przy tarciu zachodzą po większej części drobne zmiany w cząsteczkowym układzie ciał, mianowicie na początku ich wzajemnego tarcia; później, powierzchnie tak się wzajemnie przystosowują, że zmiany przy dalszym ruchu mogą być uważane za znikomo małe. W pewnych przypadkach niema ich zupełnie, np., gdy ciecze trą się o ciało stałe lub między sobą. Pozatem zawsze zachodzą zmiany cieplne i elektryczne.

W mechanice zwykliśmy przedstawiać tarcie, jako siłę, która przeciwdziała danemu ruchowi, i której natężenie jest funkcją prędkości. Oczywiście takie ujęcie, stworzone jedynie dla ułatwienia rachunków, jest wysoce niezupełnem wyrażeniem złożonego procesu, w którym występuje wzajemne działanie rozmaitych sił cząsteczkowych. Z takiego założenia wynikało, że przy tarciu siła żywa ulega bezwzględnemu zniweczeniu; to samo przyjmowano przy uderzeniach [nie] sprężystych. Przytem jednak nie jest wzięte pod uwagę to, że, pomijając powiększenie się sił napięcia przez zgęszczenie trących lub uderzających się ciał, ciepło wywiązane jest dla nas również siłą,

która pozwala nam wywołać działania mechaniczne; siłą jest również elektryczność, powstająca w większości przypadków; z niej zaś możemy otrzymać działanie mechaniczne albo bezpośrednio przy pomocy jej sił przyciągających lub odpychających lub też pośrednio przez to, że wywiązuje ona ciepło. Pozostaje więc pytanie, czy suma tych sił zawsze odpowiada zniweczonej sile mechanicznej. W tych przypadkach, w których możliwie uniknęło się zmian cząsteczkowych i wywiązania się elektryczności, pytanie to postawione będzie w ten sposób, czy zawsze wzamian za pewną stratę siły mechanicznej powstaje oznaczona ilość ciepła, i jak dalece ilość ciepła może odpowiadać równoważnikowi siły mechanicznej. Dla rozstrzygnięcia pierwszego pytania dokonano dotychczas niewielu badań. Joule[1]) badał ilości ciepła, które powstawały przy tarciu wody w cienkich rurach i w naczyniu, w którem woda była wprawiona w ruch przez koło, zbudowane na podobieństwo turbiny; w pierwszym przypadku znalazł, że ciepło, które ogrzewa 1 kg. wody o 1° C., podnosi 452 kg. o 1 m., w drugim przypadku 521 kg.

Metody jego pomiarów za mało jednak odpowiadają trudnościom badania, żeby wyniki przez niego otrzymane mogły w jakikolwiek sposób rościć pretensję do dokładności; prawdopodobnie liczby te są za wysokie, gdyż w jego doświadczeniach ciepło może być bardzo łatwo stracone dla obserwatora, konieczna zaś strata siły mechanicznej w pozostałych częściach maszyny nie jest przez niego brana w rachubę.

Zwróćmy się teraz do dalszego pytania, o ile ciepło może odpowiadać równoważnikowi siły. Materjalna teorja ciepła musi z konieczności uważać ilość cieplika za stałą; siłę mechaniczną, według tej teorji, może on wytworzyć jedynie przez swoją dążność do rozprężania się. Dla teorji tej równoważnik siłowy ciepła może jedynie polegać na pracy, którą ciało wykonywa, przechodząc od wyższej temperatury do niższej; w tym duchu opracowali to zagadnienie Carnot i Clapeyron i znaleźli, że wszystkie wnioski z założenia takiego równoważnika sprawdzają się przynajmniej dla gazów i par.

Dla objaśnienia ciepła tarcia teorja materjalna musi zakładać, że albo ciepło, jak twierdzi W. Henry[2]), jest doprowadzane z ze-

---

[1]) J. P. Joule. On the existence of an equivalent relation between heat aud the ordinary forms of mechanical power. Phil. Mag. XXVII. 205.

[2]) Mem. of the society of Manchester. T. V, str. 2. London 1892.

wnątrz, albo że powstaje, jak to twierdził Berthollet[1]), przez zgęszczanie powierzchni i oderwanie cząstek. Dotychczas brak jednak jakiegokolwiek doświadczenia, któreby potwierdzało pierwsze założenie, że w otoczeniu oderwanych cząstek wywiązuje się zimno, odpowiadające ilości ciepła, często bardzo znacznej; drugie założenie, jeżeli nawet pominiemy, że musi ono przyjmować zupełnie nieprawdopodobne działanie zgęszczenia, którego, po większej części, nie można wykazać na wadze hydrostatycznej, upada całkowicie w przypadku tarcia płynów i w doświadczeniach, w których klin żelazny staje się dzięki kuciu rozżarzonym i miękkim, kawałek lodu topi się dzięki tarciu[2]); gdyż żelazo, które się stało miękkiem, i woda, która powstała ze stopienia, nie mogą pozostawać w stanie zgęszczonym. Pozatem wytworzenie ciepła przez ruchy elektryczne wykazuje nam, że ilość ciepła istotnie może być bezwzględnie powiększona. Jeśli pominiemy elektryczność, otrzymywaną przez tarcie, i woltaiczną, gdyż możnaby przypuścić, że w tych przypadkach cieplik, dzięki jakiemukolwiek związkowi i stosunkowi swemu do elektryczności, jest jedynie usunięty z początkowego miejsca i przeniesiony do nagrzanego przewodnika, to pozostają nam jeszcze dwa sposoby wytworzenia napięć elektrycznych na drodze czysto mechanicznej, na której nigdzie niema ciepła, które mogłoby być przeniesione, a mianowicie przez rozkład[3]) i przez ruch magnesów. Jeżeli mamy ciało, naelektryzowane dodatnio, zupełnie odosobnione, nie mogące stracić swej elektryczności, to przybliżony odosobniony przewodnik wykaże swobodną $+E$; będziemy ją mogli rozbroić na wewnętrznej zbroi baterji, przewodnik usunąć, dzięki czemu będzie on zawierał swobodną $-E$, która będzie rozbrojona na zewnętrznej zbroi pierwszej baterji lub na innej baterji. Przez powtarzanie tego doświadczenia możemy oczywiście dowolnie często elektryzować dowolnie wielką baterję, a przez jej rozbrojenie wywiązywać ciepło, które nigdzie nie znika. Zużyjemy zaś pewną ilość siły mechanicznej, przezwyciężając przy każdorazowem oddalaniu przewodnika, naelektryzowanego ujemnie, od ciała z indukowaną elektrycznością dodatnią wzajemne przyciąganie tych dwu ciał. Doświadczenie to jest istotnie wykonywane przy użyciu elektroforu do nabijania butelki lejdejskiej. To samo zachodzi w maszynach magneto-elektrycznych; dopóki magnes i twornik poru-

[1]) Statique chimique. T. I, str. 247.

[2]) Humprey Davy. Essay on heat, light and the combinations of light.

[3]) Indukcję elektrostatyczną.

szają się względem siebie, powstają prądy elektryczne, wywiązujące ciepło w drucie, zamykającym obwód; i ponieważ prądy te ciągle przeciwdziałają ruchowi twornika względem magnesu, zużywają one na to pewną część siły mechanicznej. W tym przypadku z ciał, składających maszynę, może być, oczywiście, do nieskończoności wywiązywane ciepło, które ngdzie nie znika.

Joule[1]) starał się bezpośrednio dowieść na drodze doświadczalnej, że prąd magnetoelektryczny również wytwarza ciepło, nie zaś zimno, w części spirali, znajdującej się bezpośrednio pod wpływem magnesu. Otóż z tych faktów wynika, że ilość ciepła może być bezwzględnie powiększona przez siły mechaniczne, że przeto zjawiska cieplne nie mogą pochodzić z substancji, któraby je warunkowała samem swojem istnieniem, lecz że muszą one pochodzić ze zmian, z ruchów, czy to szczególnej substancji, czy też znanych już zresztą ważkich i nieważkich substancyj, np. elektryczności lub eteru świetlnego. To, co dotychczas nazywano ilością ciepła, będzie, według tego, wyrażeniem równem: po pierwsze, sile żywej ruchu cieplnego, po drugie, ilości tych sił napięcia w atomach, które mogą wywołać taki ruch przy zmianie ich układu; pierwszej części będzie odpowiadało to, co dotychczas nazywamy ciepłem swobodnem, drugiej to, co utajonem.

— — — — — — — — — — — — — — — — —

Z rozmaitych sposobów powstawania ciepła omówiliśmy powstawanie ciepła przez promieniowanie i przez siłę mechaniczną... Pozostaje wywiązywanie ciepła w procesach chemicznych. Zjawisko to objaśniano dotychczas, jako uwalnianie się cieplika, który znajduje się w stanie utajonym w łączących się ciałach.

Według tego każdemu ciału prostemu i każdemu związkowi chemicznemu, który może wstępować w związki rzędu wyższego, musiano przypisywać oznaczoną ilość ciepła utajonego, które z konieczności należało do ich budowy chemicznej: tak więc wynikało stąd prawo, które częściowo było potwierdzone doświadczalnie, że przy chemicznem połączeniu większej ilości ciał dla tworzenia jednakowych związków zawsze była wytwarzana jednakowa ilość ciepła, bez względu na porządek i na pośrednie stopnie, w jakich związek mógł powstawać. Według naszego sposobu przedstawienia rzeczy, ciepło, powstające w chemicznych procesach, byłoby ilością siły żywej, która mogłaby być wytworzona przez oznaczoną ilość chemicznej siły

---

[1]) Phil. Magaz. 1844.

przyciągającej, i wyżej wspomniane prawo byłoby wyrażeniem zasady zachowania siły w tym przypadku.

Zanikanie ciepła równie mało zostało zbadane, jak warunki i prawa powstawania ciepła, chociaż zjawisko to niewątpliwie zachodzi. Dotychczas mamy tylko przypadki, kiedy rozpadają się związki chemiczne lub pojawiają się rzadsze stany skupienia i tym sposobem ciepło staje się utajonem. Nigdy jeszcze nie było postawione pytanie, czy ciepło znika przy wytwarzaniu siły mechanicznej, co byłoby koniecznym postulatem zachowania siły. W tej kwestji mogę przytoczyć tylko jedno doświadczenie Joule'a, które wydaje mi się bardzo pewnem. A mianowicie, Joule znalazł, że powietrze, wypływające ze zbiornika objętości 136,5 cali sześciennych, w którem znajduje się pod ciśnieniem 22 atmosfer, oziębia otaczającą wodę o 4^{0},085 F., gdy wypływa do atmosfery, której opór musi przezwyciężyć. Jeżeli zaś powietrze przepływa do próżnego zbiornika o równej objętości, stojącego w tem samem naczyniu z wodą, kiedy więc nie ma żadnego oporu do przezwyciężenia i nie wywiera żadnej siły mechanicznej, wtedy nie zachodzi zmiana temperatury".

Omówienie zjawisk elektrycznych i magnetycznych zajmuje blisko połowę rozprawy „O zachowaniu siły". Do tej bowiem dziedziny zasada równoważności, o ile pominiemy wspomniane wyżej prace Joule'a, przed Helmholtzem stosowana nigdy nie była. To też ta część rozprawy zawiera stosunkowo najwięcej nowych zupełnie poglądów. W przypadku naelektryzowanych punktów materjalnych, odpowiednikiem mechanicznej „siły napięcia" jest suma potencjałów wszystkich punktów układu, odpowiednikiem siły żywej — siła żywa tych punktów, poruszających się pod działaniem sił elektrycznych. W przypadku ogólniejszym — naelektryzowanych przewodników o rozmiarach skończonych — ruchowi przewodników towarzyszy naogół zmiana rozmieszczenia naboju na ich powierzchni; do wyrażenia siły żywej przewodników należy wobec tego dodać siłę żywą ruchu elektryczności w przewodnikach, którą odczuwamy, jako ciepło. Taką samą poprawkę musimy wprowadzić, gdy zachodzi w układzie rozbrojenie przewodników. W zjawiskach galwanicznych rozpatrzenie różnych możliwych typów ogniw doprowadza do wniosku, że zawsze ilość wywiązanego w układzie ciepła jest równa tej ilości, którąby wywiązały reakcje chemiczne, zachodzące w ogniwie bez wytwarzania prądu elektrycznego. W ogniwie termoelektrycznem „źródła siły" należy szukać w t. zw. zjawisku Peltiera,

to znaczy w fakcie, że przy przepływaniu prądu przez obwód, utworzony z dwu niejednakowych przewodników, zachodzi w jednem z miejsc spojenia pochłanianie ciepła, w drugim — wywiązywanie.

Stosując zasadę „zachowania siły", H e l m h o l t z stwierdza, że, gdy obydwa miejsca spojenia mają temperaturę jednakową, ilość ciepła wywiązanego równa jest ciepłu pochłoniętemu i że siła elektrobodźcza ogniwa termoelektrycznego wzrasta przy podnoszeniu temperatury w tym samym stosunku, co suma ciepła pochłoniętego i wywiązanego przez prąd o natężeniu równem jednostce. Działania magnetyczne rozpatruje H e l m h o l t z w ten sam sposób, co działania elektrostatyczne i, oczywiście, dochodzi do analogicznych wniosków. Przy rozpatrywaniu zjawisk elektromagnetycznych H e l m h o l t z otrzymuje ze swych rozważań taki sam wzór, jaki już wcześniej na innej zupełnie drodze wyprowadził F. N e u m a n n.

Na tych wywodach kończy się właściwie rozprawa H e l m h o l t z a; pozostałe zjawiska są już tylko pobieżnie omówione.

„Ze znanych procesów natury pozostają nam jeszcze procesy, zachodzące w organizmach.

Procesy, zachodzące w roślinach, są głównie natury chemicznej, pozatem zaś wytwarza się, przynajmniej w niektórych, niewielka ilość ciepła. Przeważnie zawierają one potężną ilość chemicznych sił napięcia, których równoważnik otrzymujemy w postaci ciepła przy spalaniu substancyj roślinnych. Jedyną siłą żywą, która jest za to, według naszych dotychczasowych wiadomości, pochłaniana przez rośliny podczas wzrostu, są promienie chemiczne światła słonecznego. Tymczasem brak nam jeszcze wszystkich danych do bliższego porównania równoważników siłowych, które są wtedy stracone lub zyskane. Dla zwierząt mamy już niektóre wytyczne punkty. Zwierzęta pobierają złożone utleniające się związki, wytworzone przez rośliny, oraz tlen, wydają też z siebie substancje po większej części spalone, w postaci kwasu węglowego i wody, częściowo zaś zredukowane do prostszych połączeń, zużywają więc pewną ilość chemicznych sił napięcia, i wytwarzają za to ciepło i siły mechaniczne. Ponieważ siły te przedstawiają stosunkowo małą pracę w porównaniu z ilością ciepła, pytanie przeto co do zachowania siły redukuje się do zagadnienia, czy spalanie i przemiana substancyj, służących do pożywienia, wytwarza taką samą ilość ciepła, jaką wydają zwierzęta. Na pytanie to można na zasadzie doświadczeń D u l o n g a i D e s p r e t z a odpowiedzieć twierdząco, przynajmniej w przybliżeniu.

— — — — — — — — — — — — — —

Sądzę, że to, co wyżej przytoczyłem, wykazuje, iż omawiane prawo nie przeczy żadnemu ze znanych dotychczas faktów nauk przyrodniczych, przez wielką zaś ilość faktów jest w uderzający sposób potwierdzone. Starałem się możliwie wyczerpująco przedstawić wnioski, które wypływają z zestawienia tego prawa z innemi znanemi dotychczas prawami przyrody, i które muszą jeszcze czekać na potwierdzenie przez doświadczenie. Celem tego badania, który niech mnie usprawiedliwi za jego część hipotetyczną, było możliwie dokładne przedstawienie fizykom teoretycznej, praktycznej i heurystycznej wagi tego prawa, którego zupełne potwierdzenie musi być uważane za główne zadanie najbliższej przyszłości fizyki".

Należy przyznać, że ocena, jaką daje swojej rozprawie H e l m h o l t z, jest raczej zbyt skromna. Sam fakt rozpatrzenia najróżnorodniejszych zjawisk fizycznych z punktu widzenia zasady „zachowania siły", stwierdzenie, że otrzymane wyniki nie stoją nigdy w sprzeczności z doświadczeniem, a nawet tu i owdzie prowadzą do lepszego zrozumienia zjawisk, nadawały badaniom nad wyznaczaniem mechanicznego równoważnika ciepła głębsze uzasadnienie. Rozprawa H e l m h o l t z a jakgdyby wypełniała program, zaledwie naszkicowany przez M a y e r a. Nie znaczyło to jednak, aby dawała ona to udowodnienie zasady „zachowania siły", którego brak powszechnie zarzucano M a y e r o w i. Podstawowe bowiem założenie H e l m h o l t z a, że wszystkie zjawiska fizyczne można ostatecznie sprowadzić do działania sił środkowych, nie jest bynajmniej oczywiste, i można je poddać w wątpliwość bez popadnięcia w sprzeczność z faktami doświadczalnemi. Wtedy jednak zasada „zachowania siły" staje się takim samym postulatem, jakim była w pracach M a y e r a i J o u l e'a, postulatem, którego ex post uzasadnienia należy szukać na drodze doświadczalnej.

Pierwsze takie uzasadnienie dawały „Uwagi o siłach przyrody nieożywionej", wykazując, w jaki sposób można obliczyć mechaniczny równoważnik ciepła, drugie — równie cenne — zawierały prace doświadczalne J o u l e'a, rozprawa H e l m h o l t z a przynosiła nowe, bardzo poważne uzasadnienie jego słuszności. W ten sposób stopniowo, dzięki coraz to nowym badaniom, coraz to nowym zastosowaniom, postulat ten nabierał cech całkowitej pewności, dźwigał się do rzędu podstawowych praw przyrody.

Sprzeczności między zasadą „zachowania siły" i twierdzeniem Carnota. — W miarę jednak utrwalania się tej zasady coraz więcej wątpliwości nastręczały wywody Carnota, a zwłaszcza analogja między pracą mechaniczną i „potęgą poruszającą" ciepła, jaką tak umiejętnie posługiwał się w swych „Uwagach". Według niej, ciepło odgrywa w silnikach cieplnych rolę taką samą, jak masa albo raczej ciężar w silnikach mechanicznych; miarą pracy jest iloczyn z ilości ciepła, pobranego z ogniska, przez niewyznaczoną zresztą w „Uwagach" Carnota funkcję temperatur ogniska i chłodnicy; według zasady „zachowania siły", równoważnikiem pracy jest samo tylko ciepło. Czy więc z przyjęciem tej zasady nie upada całe twierdzenie Carnota? W notatkach, pozostawionych przez Carnota, niema na to pytanie odpowiedzi. A pytanie było istotnie ważne; pierwszy już bowiem komentator Carnota Clapeyron (Benoît Paul, ur. w 1799 r., zm. w 1864 r.) wykazał, jak potężnem narzędziem może się okazać w ręku badacza to twierdzenie, którego uzasadnieniu poświęcone były „Uwagi".

Rozprawa Clapeyrona, ogłoszona w 1834 r., w pierwszej swej części zawierała streszczenie rozważań Carnota, przedstawionych w nowy, bardziej może przejrzysty sposób (p. pracę Clausiusa). Ale nie ten sposób, użyty w kilkanaście lat później przez Clausiusa, i od tego czasu stale przez fizyków używany, stanowił główną wartość pracy Clapeyrona. Clapeyronowi udało się wykazać, że nawet nie znając t. zw. funkcji Carnota, to znaczy nie mając możności obliczyć, jak wielką ilość pracy możemy otrzymać przy pobraniu danej ilości ciepła z ogniska, można ustalić ciekawe i ważne związki między różnemi własnościami danego ciała. Wystarczy w tym celu użyć danego ciała, zamiast powietrza, jako ciała czynnego w motorze cieplnym Carnota i zastosować do niego te same rozumowania, jakich używał Carnot. Na tej drodze można naprzykład rozwiązać zagadnienie, które nie przestawało zaprzątać uwagi konstruktorów maszyn parowych, od samego Jamesa Watta (1736—1825) poczynając, w jaki sposób zmienia się ciepło utajone parowania cieczy, gdy wzrasta temperatura, w której parowanie zachodzi. Clapeyron w kilku prawie wierszach wykazał, że wielkość ta jest zależna od zmiany prężności pary nasyconej w miarę wzrostu temperatury. Im bardziej zmienia się ta prężność przy ogrzewaniu cieczy, tem większą wartość ma ciepło utajone parowania. Jeszcze bardziej może uderzającym był związek, jaki Clapeyron wyprowadził, między cie-

płem, wywiązywanem przy zgęszczaniu ciała, i jego rozszerzalnością. Ze związku tego wynikał wniosek, który Helmholtz w rozprawie „O zachowaniu siły" nie wahał się nazwać „conajmniej nieprawdopodobnym", a mianowicie, że „zgęszczenie wody w punkcie zwrotnym jej gęstości [4°C] nie wywiąże żadnego ciepła, między zaś tym punktem i punktem zamarzania wywiąże zimno". Szczęśliwym zbiegiem okoliczności słuszność wywodów Clapeyrona w niczem nie wiązała się z hipotezą cieplika, której Clapeyron był stanowczym zwolennikiem. Dla ułatwienia bowiem sobie rachunków, Clapeyron zakładał, że temperatury ogniska i chłodnicy motoru Carnota różnią się nieskończenie mało; w tych zaś warunkach różnica w obliczeniach przy założeniu niezniszczalności cieplika (a więc, gdy przypuszczamy, że całe ciepło, pobrane z ogniska, przechodzi do chłodnicy) i przy założeniu równoważności ciepła i pracy (a więc, gdy przypuszczamy, że część ciepła zużywa się na wykonanie pracy) jest znikomo mała i może być całkowicie pominięta.

Clapeyronowi nie udało się znaleźć związku między pracą wykonaną przez motor i ciepłem pobranem z ogniska, to znaczy kształtu funkcji Carnota. Pozostała ona i nadal nieznaną. To jednak, co rozprawa Clapeyrona zawierała, wystarczało, aby zwrócić na nią powszechną uwagę. W 1843 r. przedrukowały ją w niemieckim przekładzie „Roczniki fizyki" (Annalen der Physik), redagowane przez zasłużonego fizyka Poggendorffa, najpoważniejsze podówczas czasopismo niemieckie.

Tam się z nią zapoznał Helmholtz i, zestawiając dane Clapeyrona ze wzorami, otrzymanemi przy wyznaczaniu mechanicznego równoważnika ciepła metodą Mayera, doszedł do kapitalnego wniosku, że funkcję Carnota, a więc stosunek pracy wykonanej do ciepła pobranego można wyrazić wzorem: $C = \frac{K\ (1 + \alpha t)}{a}$, gdzie K jest współczynnikiem proporcjonalności, a — mechanicznym równoważnikiem ciepła, α — współczynnikiem rozszerzalności gazów doskonałych. Z ważności jednak odkrytego przez siebie wzoru, który otwierał przed fizyką zupełnie nowe widnokręgi, Helmholtz nie zdawał sobie sprawy. Zagadnienia, omawiane przez Clapeyrona, poruszył jakby mimochodem, podobnie zresztą, jak i całą pracę Carnota, w której to tylko znalazł godnego uwagi, że i w niej uznanie niemożliwości perpetuum mobile prowadzi do „szereg[u] częściowo znanych, częściowo jeszcze nie wykazanych do-

świadczalnie praw, tyczących się ciepła właściwego i utajonego ciał natury".

Istotnym, może nawet nieświadomym motywem takiego stosunku do rozprawy Carnota był, niewątpliwie, fakt, że należyta jej ocena pociągała za sobą nowe trudności w sformułowaniu zasady „zachowania siły" i czyniła dowody Helmholtza o wiele mniej oczywistemi. To też nie jest, być może, rzeczą przypadku, że pierwszym fizykiem, który należycie ocenił wagę twierdzenia Carnota, był nie Helmholtz, jeden z wielkich twórców zasady zachowania energji, lecz William Thomson, w owym czasie nieufnie usposobiony do twierdzenia o równoważności ciepła i pracy.

THOMSON (William, lord Kelvin, ur. dn. 26 czerwca 1824 r., um. 17 grudnia 1907 r.), jest jedną z najwybitniejszych postaci między fizykami 19-go stulecia. Studja uniwersyteckie w Glasgowie, które odbywał pod kierunkiem ojca, podówczas profesora matematyki w tymże uniwersytecie, następnie pobyt we Francji, gdzie czas jakiś, dopóki nie powołano go w 1846 r. na katedrę fizyki w Glasgowie, pracował w laboratorjum Regnaulta, w niesłychanie szczęśliwy dla nauki sposób nadały pracom jego i myślom podwójny odcień. Z jednej strony po całym szeregu sławnych angielskich uczonych Greenie, Hamiltonie, Faradayu odziedziczył on niechęć do wszelkich nieusprawiedliwionych potrzebą hipotez, poczucie konieczności łączenia zagadnień praktycznych z teoretycznemi [1]), nietracenia ani na chwilę z oczu faktów doświadczalnych; z drugiej strony pisma wielkich francuskich matematyków Laplace'a, Fouriera, Fresnela myślom jego nadały zwięzłość, jasność, przejrzystość i pomogły mu do wyrobienia tej niezwykłej zdolności, o której z podziwem wyrażał się Helmholtz, ujmowania wszystkich faktów w równania matematyczne.

---

[1]) „Nie można popełnić większego błędu, jak lekce sobie ważąc zastosowania praktyczne nauki. Zastosowania te są duszą i życiem nauki i podobnie, jak wielkie postępy nauk matematycznych, były wywołane potrzebą rozwiązania zagadnień o wielkiem znaczeniu praktycznem, tak samo większość najważniejszych odkryć w naukach fizycznych, od chwili ich powstania, aż do dziś dnia, musimy przypisać silnemu dążeniu zastosowania znajomości własności materji do czegoś, coby mogło być pożytecznem dla ludzkości". („Electrical Units of Measurements", tłum. z przekładu francuskiego „Les unités électriques de mesure", traduit par Gustave Richard, Paris. Gauthier-Villars, 1884, str. 9—10).

Ta podwójna cecha jego umysłu zaznacza się już w pierwszych jego pracach w 1841 r., gdy będąc 17-letnim chłopcem, ogłasza szereg krótkich notatek, poświęconych rozbiorowi równania Fouriera. Równanie to, będące wyrażeniem praw przewodnictwa cieplnego, Thomson stosuje wkrótce do zagadnienia konkretnego, do obliczenia „wieku ziemi", to znaczy czasu, który upłynął od chwili jej zestalenia, od chwili więc, kiedy wielkie źródła energji cieplnej przestały być czynne i kiedy stan cieplny różnych części ziemi zaczął zależeć jedynie od przewodnictwa. Zagadnienie to, dużej wagi dla geologji, przez długie lata zajmowało Thomsona. W 1858 roku organizuje on badania temperatur wnętrza ziemi dla wyznaczenia spadu temperatury; w 1862 r. rozpoczyna polemikę z geologami, których obliczenia były w sprzeczności z jego obliczeniami. Polemika ta, trwająca do roku 1878, nie rozstrzygnęła bynajmniej zagadnienia, na które odkrycie radu rzuciło zupełnie nowe światło.

Z drugiej strony badanie przewodnictwa cieplnego naprowadziło go na ślad pracy Carnota. Podczas pobytu w Paryżu szukał on gorliwie oryginalnego wydania „Uwag o potędze poruszającej ognia", bez powodzenia jednak. O swej niefortunnej odyssei opowiada w artykule o rozpraszaniu energji, ogłoszonym w 1892 r., w sposób następujący:

„Wchodziłem do wszystkich księgarzy, których mogłem znaleźć, prosząc o „potęgę poruszającą ognia" przez Carnota. „Caino? Nie znam tego autora". Z wielkim trudem starałem się wytłumaczyć, że chciałem wymówić *r*, nie zaś *i*. „Ah! Ca-rrr-not! oto jego praca". I pokazywano mi jakąś książkę o kwestji społecznej przez Hipolita Carnota (młodszego brata Sadi), ale „potęga poruszająca ognia" była zupełnie nieznana".

Wreszcie w 1849 r. otrzymał od jednego z kolegów oryginał broszury Carnota, którą, jak inni fizycy, znał dotychczas z opracowań Clapeyrona. Wtedy (właściwie już w 1848 r.) rozpoczyna się jego działalność na polu termodynamiki. W tej dziedzinie umysł Thomsona wyraźnie wykazał swoją odrębność. Gdy Clausius np. jest, bądź co bądź, zasuggestjonowany mechaniczną teorją ciepła i z niej czyni podstawę nauki o cieple, Rankine zbytecznie zaciemnia swoje cenne uwagi dość niejasnemi hipotezami o budowie materji, Helmholtz, jak w pierwszej swej pracy, tak i w późniejszych, stara się sprowadzić obiedwie zasady do ogólnych zasad mechaniki, Thomson odrzuca wszelkie hipotezy pomocnicze, staje na gruncie faktów i na nich jedynie opiera

swoje twierdzenia. Lata 1851 i 52 były w twórczości Thomsona wyjątkowo płodnemi. Oprócz podstawowych prac z termodynamiki, wtedy też ukazały się pierwsze prace, dotyczące elektryczności, które wkrótce miały uczynić sławnem nazwisko Thomsona. Do badań tych po części skłoniło go zagadnienie praktyczne, które w owym czasie zajmowało umysły inżynierów i przemysłowców. Chodziło o założenie linji telegrafu podmorskiego między Irlandją i Stanami Zjednoczonemi. Przedsięwzięcie to nastręczało wiele trudności: przedewszystkiem niezwykła długość kabli stawiała na porządku dziennym zapytanie, z jaką prędkością będą się w nich rozchodziły sygnały elektryczne, następnie dużo kłopotu sprawiał wybór materjału, zarówno przewodnika, jak i izolatorów, nie był też zupełnie opracowany sposób zanurzania kabli w oceanie. W listach, pisanych do Stokesa w 1854 r., Thomson wyłożył teorję rozchodzenia się oddzielnych sygnałów elektrycznych. Listy te zwróciły na niego uwagę i spowodowały, że zarząd T-wa telegrafu podmorskiego powierzył mu obowiązki doradcy technicznego. Thomson z zapałem oddał się swej nowej pracy; po wielu wysiłkach, po dwukrotnem rozerwaniu się kabla (w 1857 i 1858), doprowadzono wreszcie w 1866 roku całe przedsięwzięcie do końca. W pierwszej depeszy, przesłanej przez prezydenta Stanów Zjednoczonych, był oddany hołd zasłudze Thomsona. Od tego czasu kula ziemska została opasana siecią kabli, tak że w 1896 roku podczas jubileuszu Thomsona depesza z życzeniami, wysłana z Glasgowa przez administrację angielskiego telegrafu podmorskiego, mogła już obiec dookoła całą ziemię i wrócić z powrotem do Glasgowa po upływie siedmiu i pół minuty.

W tym okresie czasu powstały jego prace nad budową przyrządów do pomiarów elektrycznych. Wtedy zostały obmyślone i zbudowane: elektrometr bezwzględny, elektrometr kwadrantowy, galwanometr zwierciadłowy o ruchomym magnesie i wreszcie elektrometr „kieszonkowy", do którego zbudowania przyczynił się poniekąd przyjaciel jego i kolega Tait. Sprawa miała się w ten sposób. Thomson zbudował elektrometr, który ważył nie więcej, niż 2 kg.

„Pewnego dnia, opowiada Thomson w swoich „Odczytach o pomiarach elektrycznych", pokazywałem go z dumą profesorowi Taitowi i powiedziałem mu: „Powinien pan postarać się o podobny elektrometr". — „Poczekam, odpowiedział mi Tait, aż pan zrobi taki elektrometr, któryby można włożyć do kieszeni; niech go pan zrobi wielkości pomarańczy, a wezmę go".

Thomson przyjął wyzwanie, i tym sposobem powstał ów elektrometr.

Prace nad temi zagadnieniami przekonały go o konieczności wprowadzenia jakiegoś ładu do układu jednostek elektrycznych, podówczas używanych. System metryczny, z którym się w czasie pobytu w Paryżu zetknął, zachęcił go do oparcia na podobnych zasadach układu jednostek elektrycznych. W 1861 r. dzięki jego staraniom powstała przy „British Association" komisja, mająca na celu opracowanie układu bezwzględnych jednostek elektrycznych. Prace tej komisji zostały w 1881 r. przedstawione komisji międzynarodowej, zwołanej do Paryża. Prace międzynarodowej komisji początkowo nie szły gładko, głównie z powodu opozycji Wernera Siemensa, który chciał, aby za jednostkę oporu przyjąć jednostkę zupełnie dowolną, t. zw. jednostkę Siemensa. Kiedy zdawało się, że prace komisji spełzną na niczem, Thomson wystąpił w roli pośrednika. Na prywatnem zebraniu w numerze hotelowym, zajmowanym przez Thomsona i jego żonę, obecni tam przedstawiciele Anglji: Thomson i William Siemens, Niemiec: Helmholtz, Clausius, Kirchhoff i Wiedemann oraz Francji: Mascart zdołali przełamać opór Wernera Siemensa i skłonić go do przyjęcia obowiązujących nas obecnie określeń oma i wolta. Pozostawały jeszcze jednostki natężenia prądu, ilości elektryczności i pojemności elektrycznej. Ponieważ czas naglił, a posiedzenia komisji były chwilowo zawieszone na znak żałoby po śmierci prezydenta Stanów Zjednoczonych Garfielda, zebrano się w mniejszem już towarzystwie w kawiarni, i tam Thomson, Helmholtz i Mascart opracowali dokładne określenie ampera, kulomba i farada.

Jednocześnie z temi pracami o charakterze poniekąd praktycznym Thomson opracował metodę t. zw. obrazów elektrycznych, pozwalającą w sposób bardzo prosty i jasny rozwiązywać zagadnienie rozmieszczenia nabojów elektrycznych w danem polu elektrycznem.

Zakładanie kabli telegrafu podmorskiego i związane z tem zajęcia Thomsona zmuszały go do częstego przebywania na morzu. Żywy umysł jego napotkał szereg nowych zagadnień, do których rozwiązania zabrał się z całą energją. W ten sposób powstały prace z hydrodynamiki, gałęzi wiedzy, którą Thomson znał doskonale dzięki znakomitym wykładom Stokesa, na które pilnie uczęszczał, i dzięki osobistym przyjacielskim stosunkom, jakie go ze Stokesem łączyły. Zajmując się badaniem ruchu fal na oceanie, Thomson

zbudował przyrząd do analizy składowych harmonicznych perjodycznych ruchów morza.

Te badania doprowadziły go do słynnej teorji budowy materji. W 1858 roku ukazała się praca Helmholtza, wykazująca, że w płynie, nie posiadającym lepkości, wir, który raz powstał, trwa wiecznie. Thomson użył w 1867 r. tego twierdzenia do wprowadzenia pewnych poprawek do analogicznej teorji Rankine'a i zbudował teorję wirów atomowych, teorję spójną, wytrzymującą najsurowszą krytykę.

Do tych niepospolitych zalet umysłu dołączały się jeszcze niezwykłe zalety serca. Wrodzona uprzejmość i dobroć przywiązywały do niego wszystkich, którzy się z nim stykali. Brak jakiejkolwiek zawiści zawodowej i ogromne umiłowanie wiedzy sprawiały, że każdy nowy wynalazek, każdy triumf naukowy człowieka zupełnie mu obcego przejmowały go najżywszą radością.

W ogłoszonej w 1848 r. rozprawie p. t. „O bezwzględnej skali termometrycznej" Thomson pisał[1]: „Poglądu przeciwnego [t. zn. równoważności ciepła i pracy] bronił p. Joule z Manchesteru; kilka istotnie godnych uwagi odkryć, jakie poczynił co do wytwarzania ciepła przez tarcie cieczy w ruchu, i kilka znanych doświadczeń z maszynami magneto - elektrycznemi, zdają się wskazywać na istotną (actual) zamianę działań mechanicznych w cieplne. Nie zostało jednak wykonane żadne doświadczenie, w którem byłaby wykonana zamiana odwrotna; ale należy wyznać, że, jak dotychczas, wiele z rzeczy, związanych z temi podstawowemi zagadnieniami filozofji przyrody, otoczone jest tajemnicą". Dlatego w pracy Carnota zwrócił on uwagę nie na założenie, dotyczące istoty ciepła, lecz na wnioski, jakie można było wyprowadzić z twierdzenia Carnota. Pierwszym takim wnioskiem było stwierdzenie, że funkcja Carnota może służyć za punkt wyjścia nowej skali termometrycznej, tym razem istotnie bezwzględnej; skale bowiem zazwyczaj używane nie są, ściśle biorąc, niczem innem, jak „dowolnym szeregiem ponumerowanych punktów odniesienia, wystarczającym dla wymagań termometrji praktycznej".

„W obecnym stanie nauk fizycznych zjawia się niezwykle ważne zapytanie: czy istnieje jakakolwiek zasada, na której możnaby było oprzeć bezwzględną skalę termometryczną? Wydaje mi się, że twier-

[1]) Cytowane według Macha „Prinzipien der Wärmelehre".

dzenie Carnota o potędze poruszającej ognia pozwala nam dać na to pytanie odpowiedź twierdzącą".

Skalę taką możnaby pomyśleć w sposób następujący: nazwijmy stopniem tej nowej skali taką różnicę temperatur ogniska i chłodnicy, przy której spadek jednostki ciepła wytworzy zawsze tę samą pracę. „Cechą charakterystyczną proponowanej przez mnie skali jest to, że wszystkie stopnie posiadają tę samą wartość; to znaczy, że gdy jednostka ciepła będzie przechodziła z ciała *A* o temperaturze T^0 tej skali do ciała *B* o temperaturze (T—1^0), wytwarzać będzie zawsze jednakowe działanie mechaniczne bez względu na to, jaką będzie liczba T. Taka skala może być słusznie nazwana skalą bezwzględną, cechy jej bowiem są zupełnie niezależne od własności fizycznych jakiejkolwiek szczególnej substancji".

Stosunek tej skali do zwykłej skali gazowej jest dość zawiły: stopnie skali pierwszej stają się coraz to większe w porównaniu ze stopniami skali gazowej, im wyższe rozpatrujemy temperatury. Wobec tego Thomson pomysłu swego całkowicie nie rozwinął, wrócił do niego dopiero w 1854 r., nadając mu inną zupełnie postać.

Twierdzenie Carnota nie przestało go jednak interesować, zwłaszcza, gdy brat jego James, posługując się rozumowaniem analogicznem do tego, jakiego użył w swej rozprawie Clapeyron, udowodnił, że punkt topliwości lodu obniża się ze wzrostem ciśnienia. Ale jednocześnie z dowodami słuszności tego twierdzenia mnożyły się prace, wykazujące coraz dobitniej równoważność ciepła i pracy. Ignorowanie tych prac stawało się niemożliwością. Zmiana stanowiska Thomsona ujawniła się już w następnej jego pracy, ogłoszonej w 1849 r. p. t. „Przyczynek do teorji Carnota o potędze poruszającej ciepła" (An Account of Carnots theory of the motive power of Heat) [1].

„Niezwykle ważne odkrycia, dokonane ostatnio przez p. Joule'a z Manchesteru, że ciepło powstaje w każdej części zamkniętego przewodnika elektrycznego, poruszanego w sąsiedztwie magnesu, i że ciepło jest stwarzane przez tarcie cieczy w ruchu, obaliło, jak się zdaje, powszechnie uznawany pogląd, że ciepło nie może być stwarzane (generated), lecz jedynie otrzymywane (produced) ze źródła, w którem istniało poprzednio w postaci utajonej lub jawnej.

W obecnym jednak stanie nauk nie znamy żadnego zabiegu, dzięki któremu ciepło mogłoby być pochłonięte przez ciało, nie podnosząc

---

[1]) Cytowane według Macha „Prinzipien der Wärmelehre".

jego temperatury lub nie wywołując jakiejś zmiany w jego warunkach fizycznych; i zasadniczy pewnik, przyjęty przez Carnota, możemy i nadal uważać za najprawdopodobniejszą podstawę do badania poruszającej potęgi ciepła; jakkolwiek i ona, a z nią każda inna gałąź teorji ciepła może ostatecznie wymagać przebudowania na innych zasadach, gdy nasze dane doświadczalne będą bardziej zupełne. W tem rozumieniu i unikając powtarzania zastrzeżeń, wyłożę podstawową zasadę Carnota i wszystkie wynikające z niej wnioski tak, jak gdyby jej prawdziwość była całkowicie ustalona..."

„Może się wydawać, że trudności [pogodzenia zasady „zachowania siły" z zasadą Carnota] można całkowicie uniknąć, odrzucając podstawowy pewnik Carnota; taki pogląd energicznie popiera p. Joule... Gdybyśmy jednak w ten sposób postąpili, napotkalibyśmy inne niezliczone trudności — nie do przezwyciężenia bez dalszych badań doświadczalnych i bez zupełnej od podstaw przebudowy teorji ciepła..."

Ostateczne sformułowanie zasad termodynamiki. — Prace Clausiusa i Thomsona. — Zanim jednak Thomson dokonał tej przebudowy, ukazała się w 1850 r. rozprawa Clausiusa „O sile poruszającej ciepła i o prawach, które stąd można wyprowadzić dla nauki o cieple" (Ueber die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich davon für die Wärmelehre selbst ableiten lassen) [1]).

CLAUSIUS (Rudolf), ur. 2 stycznia 1822 r., um. 24 sierpnia 1888 r. Po ukończeniu studjów w Berlinie i Halli został docentem w Berlinie, w kilka zaś lat później profesorem fizyki w politechnice w Zurychu. W 1866 r. był powołany na katedrę fizyki w Würzburgu, a w 1869 r. przeniósł się do uniwersytetu w Bonn, gdzie pozostał do śmierci. Posiadając dar teoretycznego ujmowania zagadnień, nie zajmował się nigdy ich stroną doświadczalną; w badaniach swoich jednak nie zaniedbywał uwzględniać danych, ustalonych doświadczalnie. Dorobek jego naukowy posiada do dziś ogromne znaczenie.

Clausius, zaznaczając na wstępie, że z pracą Carnota zapoznał się z opracowań Clapeyrona i Thomsona, pod-

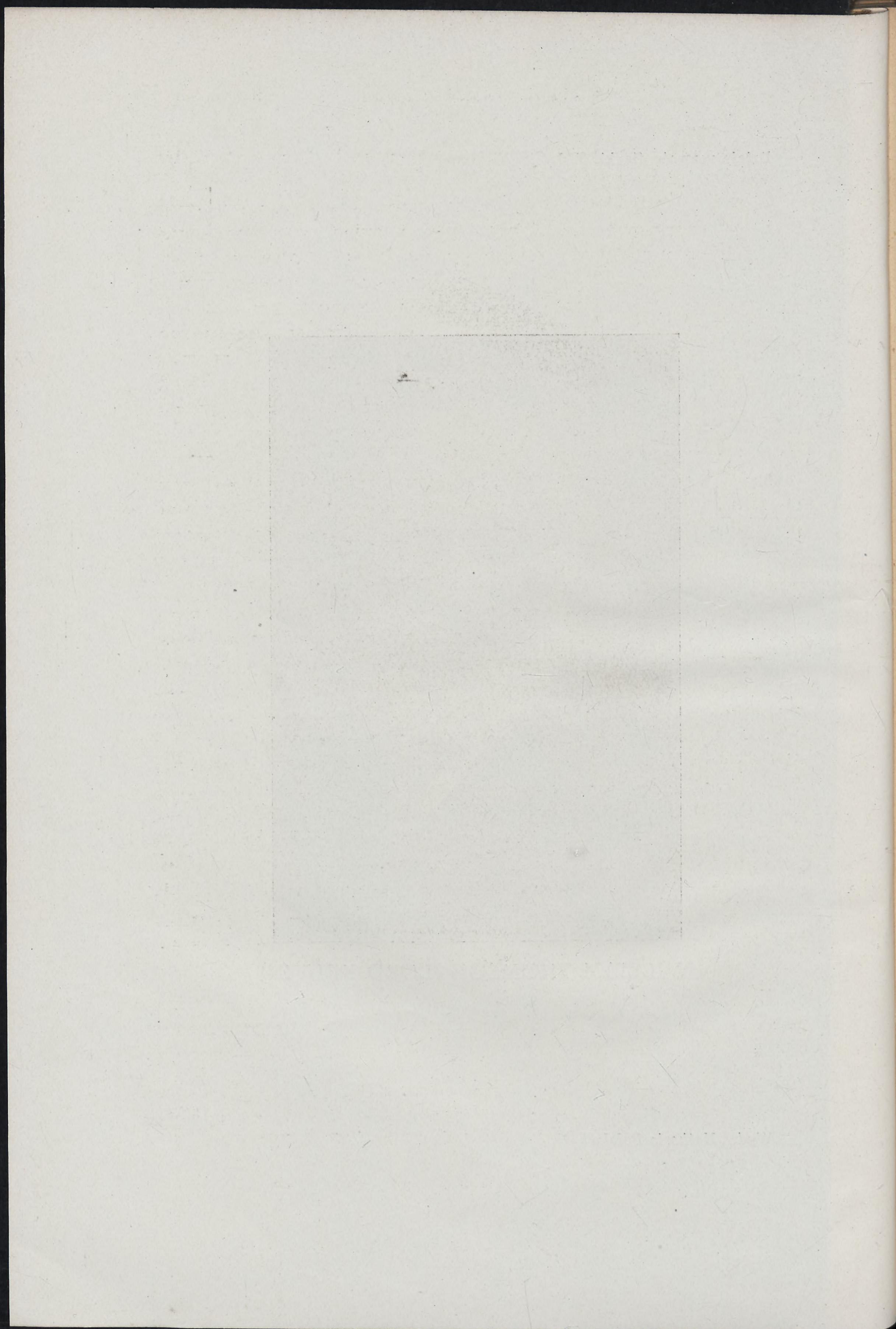
---

[1]) Ustępy z tej pracy są przytoczone według przedruku w „Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften" Nr. 99.



WILLIAM THOMSON (LORD KELVIN)

Wyd. „Mathesis Polska".



daje szczegółowemu rozważeniu zarówno wywody Carnota, jak i zastrzeżenia, wysunięte przez Thomsona.

„Carnot dowodzi, że za każdym razem, gdy ciepło wykonywa pracę, i jednocześnie nie zachodzi trwała zmiana w stanie działającego ciała, pewna ilość ciepła przechodzi z ciała ciepłego do zimnego... To przeniesienie uważa on za zmianę cieplną, odpowiadającą wykonanej pracy. Mówi wyraźnie, że ciepło przy tem nie ginie, lecz że ilość ciepła pozostaje niezmienną, przyczem dodaje: „Fakt ten nigdy nie był podawany w wątpliwość; przyjęty był początkowo bez rozważania i następnie w wielu przypadkach sprawdzony przez doświadczenia kalorymetryczne. Zaprzeczyć mu, znaczyłoby obalić całą teorję ciepła, której jest podstawą". Nie jest mi jednak znane, żeby w sposób dostatecznie pewny stwierdzono w doświadczeniu, że przy wytwarzaniu pracy nigdy nie zachodzi strata ciepła[1]; można raczej twierdzić z większem, być może, prawem przeciwnie, że, jeżeli podobna strata nie została jeszcze bezpośrednio wykazana, to jednak może być uważana na podstawie innych faktów nie tylko za dopuszczalną, ale nawet za wysoce prawdopodobną.

Jeżeli przyjmiemy, że ciepło podobnie, jak materja nie może zmniejszać się co do ilości, to musimy również przyjąć, że nie może się powiększać. Jest jednak rzeczą prawie niemożliwą objaśnić ogrzewanie, wywołane np. przez tarcie, bez przypuszczenia, że ilość ciepła się powiększa; dzięki starannym badaniom Joule'a, w których przy użyciu pracy mechanicznej było najrozmaitszemi sposobami wytwarzane ogrzewanie, stało się prawie pewnem twierdzenie, że z jednej strony wogóle można powiększać ilość ciepła, z drugiej zaś, że ilość nowowytworzonego ciepła jest proporcjonalna do użytej na to pracy. Do tego dodać jeszcze należy, że w nowszych czasach coraz więcej poznajemy faktów, przemawiających za tem, że ciepło nie jest substancją, lecz polega na ruchu najmniejszych ciał. Jeżeli to jest słuszne, to do ciepła również możemy stosować ogólne twierdzenie mechaniki, że istniejący ruch możemy zamieniać na pracę i przytem tak, że strata żywej siły jest proporcjonalna do wykonanej pracy.

— — — — — — — — — — — — — —

[1]) Dowód przechodzenia ciepła w pracę w maszynie parowej dał w kilka lat później Hirn. Mierzył on ilość ciepła, pobraną z ogniska, i ilość oddaną chłodnicy i stwierdził, że różnica ich jest równoważna wykonanej pracy.

[Thomson] wyraźnie mówi o przeszkodach, które nie pozwalają na przyjęcie bez zastrzeżeń teorji Carnota, przyczem powołuje się przedewszystkiem na badania Joule'a i zwraca również uwagę na zasadniczy zarzut, jaki możnaby jej uczynić. Mianowicie, jeżeli przy każdem wytwarzaniu pracy, o ile ciało czynne po jej wytworzeniu jest znów w tym samym stanie, co poprzednio, ciepło przechodzi z ciała ciepłego do zimnego, to jednak odwrotnie nie przy każdem takiem przejściu będzie również wytwarzana praca; gdyż ciepło może być również przeniesione przez proste przewodzenie; w tych wszystkich przeto przypadkach, o ile samo przejście ciepła byłoby istotnym równoważnikiem pracy, zachodziłaby w przyrodzie strata siły pracy, co nie łatwo można sobie wystawić. Mimo to, dochodzi on do wniosku, że przy obecnym stanie nauki należy uważać zasadę, przyjętą przez Carnota, za najprawdopodobniejszą podstawę badania poruszającej siły ciepła i mówi: „jeżeli odrzucimy tę zasadę, napotkamy inne niezliczone trudności, które są nie do przezwyciężenia bez dalszych badań doświadczalnych i bez zupełnej przebudowy od podstaw teorji ciepła.

Sądzę jednak, że nie należy się odstraszać temi trudnościami i raczej należy, o ile możności, zżyć się z wnioskami, wypływającemi z poglądu, że ciepło jest ruchem, wobec tego, że na tej jedynie drodze możemy znaleźć środek na ustalenie lub obalenie tego poglądu. Również nie uważam tych trudności za tak znaczne, jak to przedstawia Thomson, gdyż, jeżeli należy również pewne rzeczy zmienić w używanych do dziś wyobrażeniach, to jednak nigdzie nie mogę znaleźć sprzeczności z dowiedzionemi faktami. Nie jest nawet rzeczą konieczną odrzucać przytem zupełnie teorję Carnota, na co z pewnością trudno byłoby się zdecydować, gdyż znalazła ona częściowo uderzające potwierdzenie w doświadczeniu. Przy bliższem jednak rozpatrzeniu znajdujemy, że z nowym sposobem rozważania jest w sprzeczności nie właściwa podstawowa zasada Carnota, lecz jedynie dodatek, że ciepło nie ginie, gdyż przy wytwarzaniu pracy ilość ciepła jest zużywana, inna zaś jest przenoszona z ciała ciepłego do zimnego, i obiedwie ilości ciepła mogą być w oznaczonym związku z wytworzoną pracą. Lepiej się to uwydatni w dalszym ciągu, i okaże się wtedy, że wynikające z obydwu założeń wnioski nie tylko mogą się ostać obok siebie, lecz nawet potwierdzają się wzajemnie".

Jeżeli więc hipoteza niezniszczalności cieplika jest czemś wtórnem w dowodzeniu Carnota, to należy rozpatrzeć, jakie zmiany

trzeba wprowadzić do rozumowania Carnota, aby twierdzenie jego uzgodnić z zasadą równoważności ciepła i pracy. Przyjmijmy „ogólnie, że istnieje ruch cząstek i że ciepło jest miarą jego siły żywej lub raczej, jeszcze ogólniej, [ustalmy] jedynie, jako podstawowe twierdzenie, uwarunkowane powyższem założeniem, co następuje:

we wszystkich przypadkach, gdy z ciepła powstaje praca, jest zużywana ilość ciepła proporcjonalna do wytworzonej pracy, i odwrotnie, przez zużycie równie wielkiej pracy może być wytworzona ta sama ilość ciepła".

Ale wtedy cieplik, albo „ciepło łączne", jak je nazywa Clausius, nie może być funkcją stanu ciała.

„Mówi się często o łącznem (gesammte) cieple ciał, zwłaszcza gazów i par, przyczem rozumie się przez nie sumę ciepła swobodnego i utajonego, i przyjmuje się, że jest ono wielkością zależną jedynie od obecnego stanu rozpatrywanego ciała tak, że, gdy się zna wszystkie jego pozostałe własności fizyczne, jego temperaturę, jego gęstość i t. d., to również jest dokładnie oznaczone zawarte w niem ciepło łączne. Takie założenie nie jest już jednak dopuszczalne wobec poprzedniego twierdzenia zasadniczego. Gdy, mianowicie, dane jest ciało w oznaczonym stanie, np. pewna ilość gazu w temperaturze t_0 i objętości v_0 i gdy wywołujemy w nim rozmaite zmiany temperatury i objętości, lecz ostatecznie doprowadzamy go znowu od stanu początkowego, to, według owego założenia, jego ciepło łączne znowu musi być takie same, jak i z początku; stąd wynika, że gdy podczas jednej części przemian było mu udzielane ciepło zzewnątrz, podczas drugiej części to samo ciepło musiało być z powrotem oddane nazewnątrz. Przy wszelkiej jednak zmianie objętości będzie przez gaz wykonana lub zużyta pewna praca, gdyż przy rozszerzaniu przezwycięża on ciśnienie zewnętrzne, i odwrotnie, ściskanie może być wywołane jedynie przez przesuwanie się w kierunku działania ciśnienia zewnętrznego. Jeżeli więc przy wykonanych w nim zmianach zaszły również zmiany objętości, to musiała być tutaj również zużyta i wykonana praca. Nie jest jednak konieczne, aby ostatecznie, gdy ciało doszło do swego poprzedniego stanu, cała wytworzona praca była równa zużytej tak, żeby się wzajemnie znosiły, lecz może powstać nadwyżka jednej lub drugiej, zależnie od tego, czy ściskanie zachodziło w wyższej lub niższej temperaturze, niż rozszerzanie... Tej nadwyżce wytworzonej lub zużytej pracy musi według podstawowego twierdzenia odpowiadać proporcjonalna nadwyżka zużytego

lub wytworzonego ciepła; gaz więc może oddać nazewnątrz nie tyle ciepła, ile zzewnątrz pobrał.

Tę samą sprzeczność z ogólnie przyjmowanem założeniem co do ciepła łącznego można jeszcze przedstawić w sposób nieco odmienny. Gdy gaz o t_0 i v_0 ma być doprowadzony do wyższej temperatury t_1 i większej objętości v_1, to ilość ciepła, której musimy w tym celu gazowi udzielić, byłaby, według owego założenia, niezależna od sposobu, w jaki się odbywa ta zmiana; z powyższego jednak zasadniczego twierdzenia wynika, że będzie ona różna zależnie od tego, czy gaz naprzód jest ogrzany w stałej objętości v_0 i następnie podlega rozszerzaniu w stałej temperaturze t_1, czy też naprzód zachodzi rozszerzenie w temperaturze t_0, i następnie odbywa się ogrzewanie, lub też rozszerzanie i ogrzewanie zmieniają się w jakikolwiek inny sposób lub też obadwa jednocześnie zachodzą; gdyż w tych wszystkich przypadkach praca, wykonana przez gaz, jest różna.

Również, gdy pewna ilość wody o temperaturze t_0 ma być zamieniona na parę o temperaturze t_1 i objętości v_1, musimy uwzględnić różnicę w ilości potrzebnego na to ciepła, w zależności od tego, czy woda jest naprzód ogrzana, jako taka, do t_1 i następnie odparowana, czy też odparowana w t_0 i następnie doprowadzona do żądanej objętości i żądanej temperatury v_1 i t_1, czy też wreszcie parowanie zachodzi w jakiejkolwiek przeciętnej temperaturze".

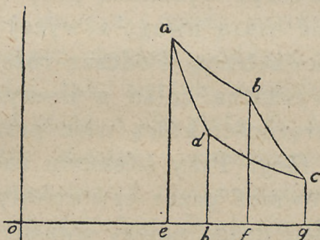
Pojęcie więc „ciepła łącznego" musi ulec dokładniejszemu zbadaniu. Ogólnie biorąc składa się ono z dwu części: ciepła swobodnego i ciepła utajonego. Pierwsze z nich ujawnia się w podniesieniu temperatury ciała, drugie „nietylko jest, jak z nazwy jej wynika, ukryte przed naszemi zmysłami, lecz naogół nie istnieje; zużyło się podczas przemian na pracę".

Praca ta może być dwojakiego rodzaju. W podanym wyżej przykładzie z parą musimy rozróżniać pracę zużytą na „przezwyciężenie wzajemnego przyciągania cząstek wody i na odsunięcie ich na taką odległość, w jakiej znajdują się, tworząc parę" i pracę, wykonywaną przez parę przy zwiększaniu swej objętości. „Pierwszą pracę nazywać będziemy wewnętrzną, drugą zewnętrzną i taki sam podział zastosujemy do ciepła utajonego". Jest rzeczą jasną, że praca wewnętrzna, podobnie, jak i ciepło swobodne, nie zależy od „drogi przemian". Sumę więc tych dwu wielkości, nazwaną później przez Clausiusa energją wewnętrzną ciała, nie zaś „ciepło łączne" można uważać za wielkość zależną jedynie od stanu fizycznego ciała.

Po tych zastrzeżeniach Clausius przystępuje do rozpatrzenia

cyklu Carnota w tej postaci, jaką mu nadał Clapeyron. Za ciała czynne wybiera „gazy stałe i pary przy maximum ich gęstości [pary nasycone], te bowiem przypadki dzięki otrzymanym na innej drodze wiadomościom, są najbardziej dostępne rachunkom i pozatem są najbardziej ciekawe". Nie zmniejszy to w niczem ogólności rozważań „łatwo bowiem spostrzec, w jaki sposób można twierdzenie podstawowe zastosować do innych przypadków. Gdy jakiekolwiek ciało zmienia swą objętość, to naogół będzie przytem wytwarzana lub zużywana praca mechaniczna. W większości jednak przypadków jest rzeczą niemożliwą dokładnie ją wyznaczyć, gdyż zazwyczaj jednocześnie z pracą zewnętrzną zachodzi jeszcze nieznana praca wewnętrzna. Dla uniknięcia tej trudności Carnot zastosował wyżej wspomniany dowcipny sposób, a mianowicie poddawał on ciało rozmaitym kolejnym zmianom, tak po sobie następującym, że ciało ostatecznie znowu wracało dokładnie do swego stanu początkowego. Wtedy bowiem, jeżeli przy pewnych przemianach była wykonana praca wewnętrzna, przy innych musiała ona być zniesiona; wtedy też jest się pewnym, że praca zewnętrzna, która pozostaje w przemianach, jest również całą naogół wykonaną pracą. Clapeyron przedstawił nader poglądowo to postępowanie sposobem graficznym.

Ten sposób przedstawienia zastosujemy przedewszystkiem do gazów trwałych, z małą atoli zmianą, uwarunkowaną przez twierdzenie zasadnicze. Oznaczamy na umieszczonej figurze objętość jednostki ciężaru gazu przez odciętą *oe*, a przez rzędną *ea* jej prężność w stanie, w którym temperatura byłaby $= t$. Przyjmujemy, że gaz znajduje się w rozciągliwej powłoce, z którą jednak ciepła wymieniać nie może. Gdy teraz pozwolimy mu rozszerzać się w tej powłoce, temperatura jego obniży się, jeżeli nie udzielimy mu żadnego nowego ciepła. Aby temu zapobiec, wprowadzamy go podczas rozszerzania się w zetknięcie z ciałem *A*, które jest utrzymywane w stałej temperaturze *t*, i które udziela gazowi zawsze tyle ciepła, żeby jego temperatura także pozostała $= t$. Podczas tego rozszerzania się w stałej temperaturze prężność zmniejsza się według prawa Mariotte'a, i można ją przedstawić zapomocą rzędnej krzywej *ab*, która jest kawałkiem hiperboli równobocznej. Gdy gaz powiększył w ten sposób



Rys. 67.

swoją objętość od *oe* do *of*, odsuwamy ciało *A*, i pozwalamy gazowi dalej się rozszerzać, nie dopuszczając jednak dopływu nowego ciepła. Wtedy temperatura spadnie, i wskutek tego prężność prędzej się będzie zmniejszała, niż poprzednio, i prawo, według którego to się odbywa, będzie przedstawione przez krzywą *bc*. Gdy objętość gazu powiększy się w ten sposób od *of* do *og*, i przytem temperatura jego również obniży się od *t* do τ, wtedy zaczynamy go ściskać z powrotem, aby go doprowadzić do objętości początkowej *oe*. Wtedy temperatura jego równieżby się podniosła, gdyby był pozostawiony samemu sobie. Do tego jednak właśnie nie dopuścimy, lecz wprowadzamy go w zetknięcie z ciałem *B* o stałej temperaturze τ, któremu musi on od razu oddawać powstające ciepło tak, że zachowa stale temperaturę τ; przy tem zetknięciu ściskamy go tak daleko (o kawałek *gh*), aby pozostały kawałek *he* dokładnie wystarczył dla podniesienia temperatury gazu od τ do *t*, jeżeli podczas tego ostatniego ściśnięcia nie może on zupełnie oddawać ciepła. Podczas pierwszego ściskania prężność rośnie według prawa Mariotte'a, i będzie ona wyobrażona przez kawałek hiperboli równobocznej. Podczas ostatniego zaś prędzej zachodzi przyrost; przedstawimy go krzywą *da*. Krzywa ta musi się kończyć dokładnie w *a*, gdyż wobec tego, że w końcu zabiegów objętość i temperatura przybierają z powrotem swe wartości początkowe, to samo również musi zachodzić z prężnością, która jest funkcją temperatury i objętości. Gaz więc znajduje się obecnie znowu w tym samym stanie, co i na początku. Ażeby wyznaczyć wykonaną przy tych przemianach pracę, powinniśmy zwrócić naszą uwagę z wyżej przytoczonych przyczyn tylko na pracę zewnętrzną. Podczas rozszerzania gaz wykonywa pracę, którą wyznacza całka z iloczynu różniczki objętości przez odpowiednią prężność; którą więc przedstawiają geometrycznie czworokąty *eabf* i *fbcg*. Przy ściskaniu zaś będzie zużyta praca, przedstawiona również przez czworokąty *gcdh* i *hdae*. Przewyżkę pierwszej pracy nad drugą należy uważać za pracę ogółem wykonaną podczas przemian, i ta przewyżka będzie wyobrażona przez czworokąt *abcd*. Jeżeli wykonamy ten całkowity proces w odwrotnym porządku, to otrzymamy tę samą wielkość *abcd*, jako przewyżkę pracy zużytej nad wykonaną".

Rozwiązanie powyższe można przedstawić również w postaci analitycznej, gdy „założymy, że zmiany, jakim podlegają gazy stały się nieskończenie małemi". Na tej drodze Clausius ustala cały szereg własności gazów i par nasyconych, po większej części znalezio-

nych już poprzednio czy to doświadczalnie (R e g n a u l t, D u l o n g) czy też przy pomocy mniej lub więcej ścisłych rozumowań (C a r n o t, C l a p e y r o n, P o i s s o n), i dopiero w części drugiej, zatytułowanej „wnioski z podstawowego twierdzenia C a r n o t a w związku z poprzedniemi wywodami", przechodzi do właściwego omówienia twierdzenia C a r n o t a.

„C a r n o t przyjął, jakeśmy o tem już wyżej wspominali, ż e w y t w o r z e n i u p r a c y o d p o w i a d a, j a k o r ó w n o w a ż n i k, p r o s t e p r z e j ś c i e c i e p ł a z c i a ł a c i e p ł e g o d o z i m n e g o, p r z y c z e m i l o ś ć c i e p ł a s i ę n i e z m n i e j s z a.

Ostatnia część tego założenia, mianowicie, że ilość ciepła pozostaje nieuszczuploną, przeczy naszemu poprzedniemu twierdzeniu zasadniczemu i wobec tego musi być odrzucona, skoro chcemy utrzymać tamto twierdzenie.

Pierwsza zaś część może pozostać w głównej swej treści, gdyż, jeżeli już nie potrzebujemy jakiegoś szczególnego równoważnika dla wykonanej pracy, skorośmy uznali za taki rzeczywiste z u ż y c i e ciepła, to jednak pozostaje możliwość, że owo przejście zachodzi r ó w n o c z e ś n i e ze zużyciem i również znajduje się w oznaczonym stosunku do pracy. Wypada więc zbadać, czy to założenie posiada poza możliwością również dostateczne prawdopodobieństwo.

Zapewne, że przejście ciepła z ciała ciepłego do zimnego zachodzi w tych przypadkach, gdy ciepło wykonywa pracę i gdy jednocześnie jest spełniony warunek, aby ciało czynne znalazło się na końcu w tym samym stanie, co na początku. Widzieliśmy np. w opisanym wyżej i wyobrażonym na rys. 67 procesie, że gaz i woda parująca pobierają ciepło od ciała *A* przy zwiększaniu objętości, oddają zaś ciepło ciału *B* przy zmniejszaniu objętości, tak, że tym sposobem pewna ilość ciepła zostaje przeniesiona od ciała *A* do ciała *B*. Aby jednak móc wyprowadzić związek między ciepłem przeniesionem i pracą, konieczne jest jeszcze jedno ograniczenie. A mianowicie, ponieważ przejście ciepła może również zachodzić bez działania mechanicznego, gdy ciała ciepłe i zimne stykają się bezpośrednio, i ciepło przepływa dzięki przewodnictwu, to, jeżeli chcemy osiągnąć maximum pracy przy przejściu oznaczonej ilości ciepła między dwoma ciałami o oznaczonych temperaturach t i τ, proces musi się odbywać tak, jak to zachodziło w poprzednich przypadkach, — żeby ciała o różnych temperaturach nigdy się nie stykały ze sobą.

Otóż to maximum pracy jest tem, co mamy prównywać z przejściem ciepła; wtedy też znajdujemy, że istotnie mamy zasadę przyj-

mowania za Carnotem, że to maximum zależy jedynie od ilości ciepła przeniesionego i od temperatur t i τ obydwu ciał A i B, nie zaś od natury substancji pośredniczącej. To maximum posiada tę mianowicie własność, że przez zużycie go można z powrotem przenieść od ciała zimnego B do ciepłego A równie wielką ilość ciepła, jaka musi przejść od A do B przy wytwarzaniu go. Możemy się o tem łatwo przekonać, jeżeli sobie wyobrazimy cały wyżej opisany przebieg, jako odbywający się w odwrotnym kierunku, tak, że np. w pierwszym wypadku gaz z początku sam się rozszerza, aż temperatura jego spadnie od t do τ; następnie rozszerza się dalej w połączeniu z B, potem jest ściskany oddzielnie, aż temperatura jego znowu będzie t, i wreszcie doznaje ostatecznego ściśnięcia w połączeniu z ciałem A. Wtedy przy ściskaniu zużyjemy więcej pracy, niż się jej wytworzy przy rozszerzaniu tak, że naogół zajdzie strata pracy, równie wielka, jak wielkim był zysk, który był otrzymany przy poprzedniem doświadczeniu. Następnie ciało B odda tyleż ciepła, ile poprzednio pobrało, i ciało A pobierze tyle ciepła, ile poprzednio oddało; stąd wynika, że zarówno będzie wytworzona ta sama ilość ciepła, która poprzednio była zużyta, jak również ta ilość ciepła, która poprzednio była przeniesiona od A do B, obecnie przechodzi od B do A.

Jeżeli sobie teraz wyobrazimy, że mamy dane dwa ciała, z których jedno może wytworzyć przy oznaczonem przejściu ciepła więcej pracy, niż drugie, lub, co na jedno wychodzi, przy wykonaniu oznaczonej pracy przenosi mniej ciepła od A do B, niż drugie, to moglibyśmy używać obydwu tych ciał na przemian, przyczem wytwarzalibyśmy pracę w wyżej podanym procesie przy pomocy pierwszego i wykonywalibyśmy proces odwrotny, stosując tę samą pracę przy pomocy drugiego. Wtedy ostatecznie obydwa ciała byłyby znowu w swym stanie początkowym; dalej, wytworzona i zużyta praca znosiłyby się dokładnie, i, co za tem idzie, ilość ciepła nie mogłaby, stosownie do poprzedniego zasadniczego twierdzenia, ani się powiększyć, ani zmniejszyć. Jedynie pod względem rozkładu ciepła zaszłaby różnica, wobec tego, że większa ilość ciepła byłaby przeniesiona od B do A, niż od A do B, i, co za tem idzie, zaszłoby naogół przejście od B do A. Moglibyśmy więc przez powtarzanie naprzemian tych dwu procesów przenosić bez zużycia siły lub bez posługiwania się jakąś inną przemianą dowolną ilość ciepła z ciała zimnego do ciała ciepłego, a to przeczy zachowaniu się ciepła w innych przypadkach, wobec tego, iż wykazuje ono naogół dążność do

wyrównywania zachodzących różnic temperatury, a więc do przechodzenia z ciała cieplejszego do zimniejszego".

Różnicę więc rozumowania Clausiusa i Carnota można wyrazić w sposób następujący. Carnot zakłada, że obydwa rozpatrywane motory, pracujące w tych samych temperaturach ogniska i chłodnicy, pobierają tę samą ilość ciepła i wykazuje, że wtedy prace, przez nie wykonane, muszą być równe, inaczej bowiem moglibyśmy zbudować perpetuum mobile, co jest niemożliwością. U Clausiusa praca wykonana przez obydwa motory jest jednakowa; wtedy założenie większej wydajności jednego motoru prowadzi do wniosku, że jedynym wynikiem tych dwu cyklów zamkniętych byłoby przejście ciepła od ciała zimniejszego do ciała cieplejszego, a „to przeczy zachowaniu się ciepła w innych przypadkach". Mamy tu więc do czynienia z nowem, nieco ogólniejszem, lecz jednocześnie mniej może przejrzystem sformułowaniem podstawowej zasady Carnota, które Clausius rozwinie w późniejszych swych pracach. Pozatem główne linje rozumowania pozostają bez zmiany.

Twierdzenie Carnota nie przeczy bynajmniej zasadzie równoważności ciepła i pracy, lecz nawet szczęśliwie ją uzupełnia [1]. Dowodem wzór Clapeyrona, który Clausius podaje w kształcie następującym: $r = C(s - \sigma)\frac{dp}{dt}$, gdzie r — ciepło utajone parowania; s i σ objętości właściwe pary i cieczy, $\frac{dp}{dt}$ — prędkość z jaką

---

[1]) Jest rzeczą ciekawą, że postać, którą nadał dowodzeniu Carnota Clausius równie dobrze stosuje się przy założeniu, że praca jest równoważna „spadkowi cieplika", jak i w przypadku równoważności ciepła i pracy. Przy pierwszem założeniu większa wydajność motoru uwarunkowana jest przeniesieniem mniejszej ilości cieplika z ogniska do chłodnicy przy wykonywaniu danej ilości pracy. Oznaczmy tę ilość cieplika dla jednego motoru przez Q, drugiego przez Q'. Gdy pierwszy motor wykonywa pracę, ognisko traci ilość ciepła Q, chłodnica tyleż zyskuje. Gdy kosztem tej pracy pędzimy drugi motor w kierunku wstecznym, pobiera ciało czynne z chłodnicy ilość ciepła Q' i oddaje ją ognisku. Chłodnica traci więc ostatecznie $Q'—Q$ ciepła, ognisko tyleż zyskuje.

Zasada równoważności ciepła i pracy prowadzi nas do następujących rozważań. Niech Q_1 i Q_2 oznaczają ilości ciepła, pobranego i oddanego przez ciepło czynne w motorze pierwszym, Q_1' i Q_2' — analogiczne wielkości dla motoru drugiego. Warunek większej wydajności pierwszego motoru jest identyczny z założeniem, że Q_1 jest mniejsze od Q_1'. Z równania $Q_1—Q_2=Q_1'—Q_2'$, wyrażającego równość pracy wykonanej i zużytej, wynika, że wtedy $Q_2<Q_2'$. Przy łącznem działaniu obydwu motorów ognisko zyskuje $Q_1'—Q_1$ ciepła, chłodnica traci $Q_2'—Q_2$.

wzrasta prężność pary nasyconej w miarę wzrostu temperatury, C — funkcja Carnota. Ta ostatnia wielkość jest, jak to Clausius ustala, równa wyrażeniu $A(a+t)$, gdzie A — „mechaniczny równoważnik ciepła, odniesiony do jednostki pracy", a — odwrotność spółczynnika rozszerzalności gazów, t — temperatura. Mając te wzory, można sprawdzić, czy istotnie zgodne są one z danemi doświadczalnemi. Temu sprawdzeniu poświęcona jest pozostała część rozprawy Clausiusa; podstawiając dane, otrzymane dla wody przez Regnaulta i Gay-Lussaca, otrzymuje Clausius dla $\frac{1}{A}$ wartości 421 Kgm/kal., a więc mało się różniącą od wartości, otrzymanych przez Joule'a.

W kilka zaledwie miesięcy (w marcu 1851 r.) po wydrukowaniu rozprawy Clausiusa w „Rocznikach" Poggendorffa, ukazała się praca Williama Thomsona, pod tytułem „O dynamicznej teorji ciepła wraz z wynikami liczbowemi, wyprowadzonemi z równoważnika jednostki cieplnej p. Joule'a i z obserwacyj nad parą p. Regnaulta". (On the dynamical theory of heat with numerical results deduced from Mr. Joules equivalent of a thermal unit and Mr. Regnaults observations on steam) [1].

Notatka wstępna (Introductory notice) zawiera krótkie zestawienie prac nad wyznaczeniem mechanicznego równoważnika ciepła, i zaznacza, że celem poniższej rozprawy jest po-pierwsze „wykazanie, jakie zmiany należy wprowadzić do wniosków, sformułowanych przez Carnota i innych, którzy przyjmowali jego sposób rozważania potęgi poruszającej ciepła, gdy przyjmie się hipotezę teorji dynamicznej, przeciwną podstawowej hipotezie Carnota"; po drugie wykazanie, jaką wagę posiadają dla dynamicznej teorji dane liczbowe, otrzymane z badań Regnaulta nad parą; i wreszcie, po trzecie: „wskazanie pewnych godnych uwagi związków, jakie można ustalić między fizycznemi własnościami wszystkich substancyj przy pomocy rozumowania analogicznego do rozumowania Carnota, lecz częściowo opartego na... zasadzie teorji dynamicznej".

Rozdział 1-szy rozprawy Thomsona, zatytułowany „podsta-

[1]) Niżej podane ustępy tłumaczone są z przedruku w wydawnictwie „Harper's scientific Memoirs". Tom, zawierający pracę Thomsona, ma tytuł „The second law of Thermodynamics" translated and edited by W. F. Magie, ph. d., professor of physics in Princeton University. New York - Cincinnati - Chicago. American Book Company.

wowe zasady teorji potęgi poruszającej ciepła" wprowadza nas odrazu w samo sedno zagadnienia.

„7. Zgodnie z oczywistą zasadą, wprowadzoną jednak po raz pierwszy do teorji potęgi poruszającej ciepła przez C a r n o t a, nie można uważać działania mechanicznego, wytworzonego w jakiejkolwiek przemianie, za pochodzące ze źródła wyłącznie cieplnego, o ile przy końcu przemiany wszystkie użyte materjały nie znajdą się dokładnie w tych samych warunkach fizycznych i mechanicznych, w jakich były na początku. W pewnych „maszynach termodynamicznych", jak np. w wirującym magnesie Faradaya lub w kole Barlowa, zbudowanych w ten sposób, aby się jednostajnie obracały i wykazywały pracę przy pomocy prądu nieustannie wzbudzanego przez ciepło, udzielane dwu stykającym się metalom..., warunek ten jest w każdej chwili spełniony. Z drugiej strony, we wszystkich maszynach termodynamicznych, opartych na działaniu elektryczności, w których używa się nieciągłych prądów galwanicznych lub kawałków miękkiego żelaza o zmiennem namagnesowaniu, i we wszystkich maszynach, opartych na zachodzącem kolejno rozszerzaniu się i kurczeniu się ośrodka, zachodzą istotne zmiany w warunkach, w jakich znajduje się użyty materjał; otóż, stosownie do wyżej postawionej zasady, zmiany te muszą być ściśle perjodyczne. W jakiejkolwiek maszynie tego rodzaju szereg ruchów, wykonanych podczas okresu, w końcu którego materjały znalazły się w tych samych warunkach, w jakich znajdowały się na początku, tworzy to, co nazywać będziemy kołowym obiegiem przemian. Za każdym razem, gdy w niżej podanych ustępach jest mowa bez bliższego określenia o p r a c y w y t w o r z o n e j lub d z i a ł a n i u m e c h a n i c z n e m, w y k o n a n e m przez maszynę termodynamiczną, należy rozumieć, że działanie mechaniczne uważamy za wytworzone albo w niezmieniającej się maszynie albo w całkowitym obiegu kołowym albo w pewnej ilości całkowitych obiegów maszyny perjodycznej.

8. Za ź r ó d ł o c i e p ł a będziemy zawsze uważali ciało ciepłe, o oznaczonej stałej temperaturze, wprowadzone w zetknięcie z jakąś częścią maszyny; a gdy jakaś część maszyny ma być zabezpieczona od wzrostu temperatury (co może zajść jedynie wtedy, gdy jej odbieramy to ciepło, które było jej udzielane), to będziemy przypuszczali, żeśmy zdołali to osiągnąć przez wprowadzenie jej w zetknięcie z ciałem zimnem, które będziemy nazywali chłodnicą, o oznaczonej stałej temperaturze.

9. Cała teorja potęgi poruszającej ciepła jest oparta na dwu następujących twierdzeniach, które zawdzięczamy Joule'owi oraz Carnotowi i Clausiusowi:

Twierdzenie I. (Joule). Gdy równe ilości działania mechanicznego są jakimkolwiek sposobem wytwarzane przez źródła cieplne lub zużywane wyłącznie na działania cieplne, równe ilości ciepła są niszczone lub wytwarzane.

Twierdzenie II. (Carnot i Clausius). Gdybyśmy mieli taką maszynę, że podczas jej działania w kierunku odwrotnym czynniki fizyczne i mechaniczne w każdej części jej ruchu byłyby całkowicie odwrócone, to wtedy wykonałaby ona takie same działanie mechaniczne, jakie wytworzyłaby z danej ilości ciepła jakakolwiek maszyna termodynamiczna, o tej samej temperaturze źródła i chłodnicy.

10. Poprzednie twierdzenie należy włączyć do ogólnej „zasady mechanicznego działania"; jest ono bezsprzecznie ustalone przez dowodzenia następujące:

11. Niezależnie od tego, na mocy jakiego działania bezpośredniego wyznaczymy ciepło uzyskane lub stracone przez dane ciało w jakichkolwiek warunkach, zawsze jednak zmierzenie jego ilości będzie oparte na wyznaczeniu ilości jakiegoś ciała wzorcowego, w którem to ciepło lub jakakolwiek równa mu ilość ciepła może wywołać wzrost temperatury od temperatury przyjętej za zasadniczą do innej; wynika to stąd, że dowodem równości dwu ilości ciepła jest ich zdolność wywoływania wzrostu temperatury równych ilości jakiejkolwiek substancji od dowolnej temperatury do tej samej wyższej temperatury.

Według zaś dynamicznej teorji ciepła, temperatura substancji może wzrosnąć jedynie dzięki wykonywaniu na niej pracy w ten sposób, iż praca wytwarza w niej wmożone ruchy cieplne i wywołuje jednocześnie we wzajemnych odległościach lub w układzie cząstek substancji pewne zmiany, które mogą towarzyszyć zmianie temperatury. Praca konieczna dla wytworzenia tego całkowitego mechanicznego działania jest, rzecz prosta, proporcjonalna do ilości substancji, której temperatura podnosi się od pewnej temperatury zasadniczej do innej; a zatem, gdy ciało lub grupa ciał lub maszyna oddaje lub pobiera ciepło, to wtedy istotnie ciało wytwarza lub pobiera działanie mechaniczne, o wielkości dokładnie proporcjonalnej do ilości ciepła, wysyłanej lub pochłanianej przez ciało. Lecz praca, która jest na niem wykonywana przez siły zewnętrzne, praca,

wytworzona przez jego własne siły cząsteczkowe i cała suma, pochodząca ze zmniejszenia połowy *vis viva* ruchów cieplnych wszystkich jego części, musi ogółem równać się działaniu mechanicznemu, wytworzonemu przez ciało, a co zatem idzie, — mechanicznemu równoważnikowi ciepła, które ono wysyła (to ciepło będzie dodatnie lub ujemne odpowiednio do tego, czy suma tych wyrazów jest dodatnia lub ujemna). Niech teraz w żadnej części ciała nie zachodzi zmiana cząsteczkowa ani zmiana temperatury, lub też przypuśćmy, że dzięki kołowemu obiegowi przemian temperatura i warunki fizyczne powrócą do stanu pierwotnego, wówczas znika druga i trzecia z trzech części pracy, którą ciało ma wytworzyć, i dochodzimy przeto do wniosku, że ciepło, które ciało wysyła lub pochłania, będzie równoważnikiem cieplnym pracy, wykonanej na niem przez siły zewnętrzne lub wykonanej przez ciało przeciwko siłom zewnętrznym, co jest twierdzeniem, które mieliśmy udowodnić.

12. Dowód twierdzenia drugiego jest oparty na następującym pewniku:

Jest rzeczą niemożliwą wytworzyć przy pomocy nieożywionych czynników materjalnych działanie mechaniczne jakiejkolwiek cząstki materji przez oziębienie jej poniżej temperatury najzimniejszego z otaczających ją przedmiotów[1].

— — — — — — — — — — — — — —

[Ustęp 13 zawiera uzasadnienie twierdzenia Carnota, zgodne naogół z dowodem Clausiusa].

14. Twierdzenie to było po raz pierwszy wypowiedziane przez Carnota, jako wyraz probierza doskonałej maszyny termodynamicznej [2]. Udowodnił je, wykazując, że zaprzeczenie tego twierdzenia pociągałoby za sobą przypuszczenie możliwości zbudowania samodziałającej maszyny, którąby nieograniczenie wytwarzała działanie mechaniczne, nie czerpiąc z żadnego źródła ciepła, ani nie zużywając materjałów, ani też nie posiłkując się jakimkolwiek innym czynnikiem

[1]) Jeżeliby ten pewnik nie obowiązywał we wszystkich temperaturach, to możnaby przypuścić, że samo - działająca maszyna mogłaby być użyta do pracy i do wytwarzania działania mechanicznego przez oziębienie morza lub ziemi, przyczem jedyną granicą byłaby całkowita utrata ciepła przez morze lub ziemię albo w rzeczywistości przez cały świat materjalny.

[2]) „Account of Carnot's Theory". § 13.

fizycznym; to dowodzenie zawiera jednak zasadnicze założenie, że „w całkowitym obiegu kołowym przemian" ciało czynne wydziela taką samą ilość ciepła, jaką pobiera. Bardzo wymowne wyrażenie powątpiewania o prawdziwości tego założenia dał sam Carnot[1]; możemy je z całą pewnością (jak to starałem się wyżej wykazać) uważać za fałszywe tam, gdzie w przemianach praca mechaniczna jest naogół bądź otrzymywana bądź zużywana. Musimy tedy uznać, że oryginalne dowodzenie Carnota całkowicie upada, lecz nie możemy wyciągnąć wniosku, że twierdzenie z niego wypływające jest fałszywe. Słuszność tego wniosku wydawała mi się istotnie tak prawdopodobną, że wziąłem go w związku z zasadą Joule'a... za podstawę do badań nad potęgą poruszającą ciepła w maszynach powietrznych lub parowych.

...Jeszcze przed początkiem obecnego roku znalazłem wyżej przytoczony [ustęp 13], dowód prawdziwości tego twierdzenia... Stwierdzam to nie dlatego, abym ubiegał się o pierwszeństwo, zasługa bowiem pierwszego udowodnienia... opartego na prawidłowych zasadach przypada całkowicie Clausiusowi, który dowód swój ogłosił w maju zeszłego roku... Niech mi będzie jednak wolno dodać, że dowód ten tak, jak jest podany, znalazłem przedtem jeszcze, zanim się dowiedziałem, że Clausius czy to ogłosił, czy też udowodnił to twierdzenie. Pewnik, na którym opiera się dowód Clausiusa, brzmi, jak następuje:

Jest rzeczą niemożliwą, aby samodziałająca (selfacting) maszyna, nie zasilana przez jaki czynnik zewnętrzny, przenosiła ciepło z jednego ciała do drugiego o wyższej temperaturze.

Łatwo się można przekonać, że jakkolwiek ten pewnik różni się sposobem sformułowania od pewnika, użytego przeze mnie, to jednak każdy z nich jest wnioskiem z drugiego. Obydwa sposoby dowodzenia są ściśle analogiczne do tego, jakiego użył... Carnot.

15. Całkowita teorja potęgi poruszającej ciepła polegałaby na zastosowaniu wyżej udowodnionych dwu twierdzeń do każdej możliwej metody wytwarzania działania mechanicznego z czynnika cieplnego[2]. Probierz doskonałej maszyny, wyrażony w twierdzeniu drugiem, nie

[1]) Ibidem § 16.

[2]) „Obecnie są znane dwa, i tylko dwa, różne sposoby, zapomocą których możemy otrzymać z ciepła działanie mechaniczne. Jeden z nich jest urzeczywistniony przez zmiany objętości, których ciała doświadczają pod wpływem ciepła; drugi — za pośrednictwem działania elektrycznego". „Account of Carnot's Theory" § 4. (Transactions, vol. XVI, part. 5).

został jeszcze zastosowany do metody elektrycznej i prawdopodobnie nie będzie mógł być zastosowany bez pewnych ograniczeń; lecz zastosowanie pierwszego twierdzenia było istotnie całkowicie zbadane i doświadczalnie sprawdzone przez P. J o u l e'a w jego badaniach „O działaniach cieplnych magnetoelektryczności"; i na tem jest oparty jeden z jego sposobów doświadczalnego wyznaczania mechanicznego równoważnika ciepła. Wynika tedy z jego odkrycia praw wytwarzania się ciepła w obwodzie galwanicznym [1]), że, gdy praca mechaniczna jest przy pośrednictwie maszyny magneto-elektrycznej źródłem galwanizmu, ciepło wytwarzane w jakiejkolwiek danej nieruchomej części obwodu jest proporcjonalne do całej pracy wydatkowanej. Prócz tego znalazł on doświadczalnie, że ciepło wytwarza się w każdej poruszającej się części obwodu i posiada tę samą wartość, jaką posiadałoby, gdyby ta część obwodu była w spoczynku i gdyby przechodził przez nią prąd o tem samem natężeniu; to daje mu możność postawienia następujących wniosków:

I) Że ciepło może być stworzone przez poruszanie maszyny magneto-elektrycznej;

II) że jeżeli prądu wzbudzonego używamy tylko do wytwarzania działania cieplnego, całkowita ilość wytworzonego ciepła jest we wszystkich warunkach dokładnie proporcjonalna do ilości pracy wydatkowanej.

— — — — — — — — — — — — — —

18. Rodzaj działań cieplnych, wywołanych przez jednakowe przyczyny bardzo różnemi środkami, jest pięknie zobrazowany w następującym przykładzie, wziętym z pracy p. J o u l e'a o magneto-elektryczności. Weźmy trzy równe i podobne baterje galwaniczne, o równych i podobnych elektrodach i niech A_1 i B_1 będą końcówkami elektrod (lub drutami, połączonemi z dwoma biegunami) pierwszej baterji; A_2 i B_2 — końcówkami odpowiednich elektrod drugiej, i A_3 i B_3 — trzeciej baterji. Przypuśćmy, że A_1 i B_1 są połączone z końcami długiego, nieruchomego drutu; A_2 i B_2 są połączone z „biegunami" przyrządu elektrolitycznego, służącego do rozkładu wody; i A_3, B_3 są połączone z b i e g u n a m i... maszyny elektromagnetycznej. Jeżeli teraz długość drutu między A_1 i B_1 i prędkość ma-

[1]) Że ciepło, wywiązujące się przez dany przeciąg czasu w danej nieruchomej części obwodu, jest proporcjonalne do kwadratu natężenia prądu, a dla różnych nieruchomych części, o tem samem natężeniu prądu, ilości ciepła, wywiązującego się w jednakowym przeciągu czasu, są w takim stosunku, jak opory...

szyny między A_3 i B_3 będą tak dobrane, że natężenie prądu (który gwoli prostoty uważać możemy za ciągły i doskonale jednostajny w każdym przypadku) może być takiem samem w trzech obwodach, to wtedy przez dowolny przeciąg czasu w drucie między A_1 i B_1 wywiąże się więcej ciepła, niż w elektrolitycznym przyrządzie między A_2 i B_2, lub w maszynie pracującej między A_3 i B_3. Ale, gdybyśmy spalili wodór w tlenie wewnątrz naczynia elektrolitycznego oraz zużyli całą pracę maszyny li-tylko na wytworzenie działania cieplnego (co zaszłoby, naprzykład, jeżelibyśmy całą jej pracę zużyli na bezustanne poruszanie ograniczonej masy cieczy), to wtedy całkowite ciepło wydzielone w każdym z dwu przyrządów będzie dokładnie takiem samem, jak i w drucie między A_1 i B_1. Jest godne uwagi, że twierdzenia te są ściśle prawdziwe, jako wnioski, które możemy wyprowadzić z podstawowej teorji ciepła, odkrytej przez Joule'a, i zobrazowanej oraz sprawdzonej z największą starannością w jego licznych badaniach doświadczalnych".

Przytoczone wyżej ustępy stwierdzały ponad wszelką wątpliwość, że Thomson prawie jednocześnie doszedł do tych samych wyników, co i Clausius, nic jednak zasadniczo nowego do pracy Clausiusa nie dodawały. Dopiero część druga rozprawy Thomsona „o potędze poruszającej ognia poprzez skończoną rozciągłość temperatury" (On the Motive Power of Heat through Finite Ranges of Temperature) stanowi znakomite rozszerzenie i uogólnienie twierdzeń, podanych przez Clausiusa. Wszystkie analityczne wywody Clausiusa, podobne pod tym względem do rozważań Clapeyrona, dotyczyły przemian, zachodzących w nieskończenie małych granicach temperatur. Thomson uogólnia otrzymane przez siebie wzory na przypadek skończonej różnicy temperatur ogniska i chłodnicy. Oznaczmy temperaturę ogniska przez S, temperaturę chłodnicy przez T, ilość ciepła, pobranego przez ciało czynne z ogniska, przez H, czemu będzie równa praca, wykonana przez motor? Aby odpowiedzieć na to pytanie, Thomson rozpatruje maszynę, jako składającą się „z nieskończonej ilości maszyn doskonałych, z których każda pracuje w nieskończenie małym przedziale temperatur, i które są zestawione w szereg tak, że ognisko pierwszej jest danem ogniskiem, chłodnica ostatniej daną chłodnicą i chłodnica każdej pośredniej maszyny jest ogniskiem dla bezpośrednio po niej następującej w szeregu. Każda z tych maszyn odda chłodnicy, w przeciągu danego czasu, ilość ciepła, mniejszą od

ciepła, pobranego ze źródła, o wartość równoważną wytworzonej przez maszynę pracy mechanicznej".

Stosując do każdej z takich maszyn elementarnych wzory analogiczne do wzorów, wyprowadzonych przez Clausiusa, i następnie sumując je w danych granicach temperatur S i T, Thomson ustala związek między pracą wykonaną i temperaturą ogniska i chłodnicy. Przyjmując na funkcję Carnota wartość identyczną ze znalezioną przez Clausiusa, Thomson znajduje, że praca wykonana przez motor [1]) równa jest

$$J\frac{S-T}{\frac{1}{\alpha}+S},$$

gdzie J—mechaniczny równoważnik ciepła, α—współczynnik rozszerzalności gazów. Ze wzoru tego bezpośrednio prawie wynika inny [2])

$$\frac{H}{\frac{1}{\alpha}+S}=\frac{R}{\frac{1}{\alpha}+T},$$

gdzie H — ilość ciepła pobrana z ogniska, R — ilość ciepła oddana chłodnicy. Oznaczając te ilości ciepła przez Q_1 i Q_2, jak je dzisiaj zazwyczaj oznaczamy, i wprowadzając nową skalę temperatur, której zero będzie o $\frac{1^0}{\alpha}$ leżało niżej od temperatury topniejącego lodu, w której więc $\frac{1}{\alpha}+S=T_1$ i $\frac{1}{\alpha}+T=T_2$, otrzymamy

$$\frac{Q_1}{T_1}=\frac{Q_2}{T_2}.$$

wyrażający istotną treść twierdzenia Carnota. Wzoru tego jednak Thomson w omawianej pracy nie wyprowadził, poprzesta-

---

[1]) Przy pobraniu jednostki ciepła z ogniska; tego zastrzeżenia brak w pracy Thomsona, jest jednak ono oczywiste.

[2]) Z równoważności ciepła i pracy wynika, że praca wykonana $W_1=J(H-R)$, z drugiej zaś strony $W_1=W.H$, gdzie W praca wykonana przy pobraniu jednostki ciepła z ogniska, stąd $W_1=JH\frac{S-T}{\frac{1}{\alpha}+S}$. Mamy więc

$$J(H-R)=JH\frac{S-T}{\frac{1}{\alpha}+S}.$$

i ostatecznie wzór podany w tekście.

jąc zgodnie z zapowiedzią wstępu na porównaniu wyników przez siebie otrzymanych z danemi doświadczalnemi i na zastosowaniu „dynamicznej teorji do ustalenia związków między własnościami fizycznemi wszystkich ciał". Nie poruszył również zagadnienia nowej skali termometrycznej, mimo że, jak wynika z wyżej przytoczonego wzoru, miał dogodną ku temu sposobność. Dopiero w późniejszej pracy, ogłoszonej w maju 1854 r., wraca do tego zagadnienia i całkowicie je rozwiązuje, zakładając, że temperatury nowej skali tak winny być liczone, aby były proporcjonalne do pobranych lub oddanych ilości ciepła, a więc, żeby

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{Q_1}{Q_2},$$

co w porównaniu z wyżej podanym wzorem (str. 337) prowadzi do tego związku między nową skalą i skalą Celsjusza, o jakim wtedy była mowa.

Omówione wyżej prace Clausiusa i Thomsona ustalały, ponad wszelką wątpliwość, słuszność podstawowego założenia Carnota i stwierdzały, że jakkolwiek ciepło jest równoważne pracy, to jednak przekształcać się w nią może tylko w warunkach, sformułowanych przez Carnota, Clausiusa i Thomsona. Co więcej okazywało się, że te przemiany, jakim podlega ciało czynne w cyklu Carnota, zapewniają istotnie możliwie największą wydajność motoru; w zjawiskach rzeczywistych, nie czyniących zadość warunkom Carnota, wydajność jest o wiele gorsza. Miarę tego odstępstwa przebiegu zjawiska rzeczywistego od zjawiska idealnego, Clausius znalazł na podstawie głębokich rozważań, zawartych w drugiej z kolei swej pracy, ogłoszonej w grudniu 1854 r. p. t. „O zmienionej postaci drugiej zasady termodynamiki" (Ueber die veränderte Form des zweiten Hauptsatzes), w wielkości, którą w 1865 r. nazwał entropją [1]. Entropja lub według jej początkowej nazwy „zawartość przekształceń" (Verwandlungsinhalt) jest wielkością, charakteryzującą stan fizyczny ciała, której zmiana równa jest ilości ciepła, pobranego przez dane ciało, podzielonej przez jego temperaturę bezwzględną. W przypadku zjawisk takich, które czynią zadość warunkom t .zw. odwracalności, inaczej mówiąc tym warunkom, które postawił ciału czynnemu swego cyklu Carnot, entropja układu odosobnionego jest wielkością stałą. We

[1]) Od greckiego słowa „entropejn" — przekształcać.

wszystkich innych przypadkach, a więc w tych, które odpowiadają istotnemu, nie fikcyjnemu przebiegowi zjawisk, entropja wzrasta.

Wprowadzenie pojęcia entropji było jakby zakończeniem wielkiej pracy nad ustaleniem zasad termodynamiki. Clausius ujął je w postać aforyzmów: energja [1]) świata jest stała; entropja świata dąży do maximum; fizycy angielscy William Thomson, Maxwell, Tait drugiej zasadzie, stanowiącej uzupełnienie zasady pierwszej — zachowawczej, nadawali często nazwę zasady rozpraszania. Tak np. Maxwell w swym podręczniku ciepła zaznacza już w tytule, że tematem jego wykładu będzie „termometrja, kalorymetrja, termodynamika i rozpraszanie energji" i dalej w tekście tak wyjaśnia zadania termodynamiki: „termodynamika polega na rozważaniu energji wewnętrznej układu ciał, energji, związanej z temperaturą i stanem fizycznym ciał, jak również z ich kształtem, ruchem i ich położeniem wzajemnem. Ale tylko część tej energji jest w stanie wytworzyć pracę mechaniczną i, jakkolwiek sama energja jest niezniszczalna, część jej przydatna (available) dąży do zmniejszania się wskutek pewnych zawisk przyrody takich, jak przewodzenie i promieniowanie ciepła, tarcie i lepkość. Zjawiska te, w których część energji przestaje być przydatną, jako źródło energji, są oznaczone nazwą zjawisk rozpraszania energji" [2]).

Oszerniej omówił tę zasadę i wnioski z niej wypływające Tait w „Odczytach o współczesnych postępach fizyki" [3]).

„W danej ilości ciepła, zawartej w ciele, znajduje się, oczywiście, ta sama ilość energji, jakąkolwiek byłaby temperatura; ilość bowiem ciepła, bez względu na temperaturę, w której się ją bierze, odpowiada zawsze swemu równoważnikowi pracy. Przydatność jej jednak ulega, zależnie od okoliczności, dużym zmianom. Jeżeli macie to ciepło w ciele bardzo gorącem, możecie użyć znaczną jego część. Jeżeli zaś macie je w ciele stosunkowo zimnem, możecie bardzo mało z niego użyć. Dochodzimy w ten sposób do mówienia o wartości pewnej ilości energji cieplnej.

Wartością energji jest zdolność, jaką posiada do przekształcenia

---

[1]) Termin „energja" zaczął zyskiwać prawo obywatelstwa w fizyce od czasu ukazania się pracy Rankine'a (1853 r.), w której wyraz ten, poprzednio używany w najrozmaitszych znaczeniach, został ściśle określony.

[2]) Przytoczone według Brunhes'a „La dégradation de l'energie". Paryż, E. Flammarion. 1908 r. str. 240.

[3]) Przytaczamy według francuskiego tłumaczenia tych odczytów: „Conférences sur quelques'uns des progrès recents de la physique". Gauthier—Villars, 1887.

się w coś bardziej użytecznego, t. zn. do podniesienia się w skali energji. O ile chodzi o ciepło, wartość jego zależy całkowicie od temperatury, w jakiej się znajduje. Widzieliśmy, że maszyna cieplna, nawet doskonała, może zamieniać w pracę jedynie część użytego ciepła. Z tej części możemy wyciągnąć wszystkie korzyści, lecz druga część ciepła nie pozostaje w kotle: jest ona obniżona — zdegradowana — spadła poprzez cały szereg temperatur, zawartych między temperaturą kotła i chłodnicy, i nie może być zamieniona w pracę użyteczną, jakkolwiek ciągle jest równoważna tej samej ilości pracy, jakgdyby była w temperaturze wyższej. Co więcej, aby mogło zajść przekształcenie, musimy mieć nową maszynę, pracującą między temperaturą chłodnicy i temperaturą niższą. Wskutek tego ta część ciepła, jakkolwiek identyczna z poprzednią z punktu widzenia równoważności tej energji i energji mechanicznej, nie może być zużyta, gdyż nie mamy żadnego sposobu jej przekształcenia. Straciła ona, że tak powiem, swój stopień, straciła swoją wartość". A dalej: „Zasada rozpraszania lub obniżania (degradacja), jakbym wolał ją nazywać, polega na tem: ponieważ każde zjawisko, zachodzące w przyrodzie, pociąga za sobą przekształcenie energji i ponieważ każdemu przekształceniu towarzyszy pewne obniżenie,... energja staje się coraz mniej zdolną do przekształceń".

Możnaby więc zastąpić sformułowanie Clausiusa innem, mniej ścisłem, lecz bardziej może uwzględniającem treść fizyczną drugiej zasady, sformułowaniem, użytem przez Thomsona w jednym z jego popularnych odczytów: „Istnieje obecnie w świecie materjalnym ogólne dążenie do rozpraszania energji mechanicznej".

Podobnie więc, jak z pierwszej zasady termodynamiki wynika niemożliwość zbudowania wiecznego motoru, z drugiej wynika niemożliwość wiecznego ruchu. Stosowanie przeto do zjawisk rzeczywistych praw mechaniki, które możliwość takiego ruchu dopuszczają, prowadzi do wzorów przybliżonych, opartych na pominięciu wbrew oczywistości działań lepkości i tarcia. Całkowite ujęcie zagadnienia wymaga uzupełnienia zasad mechaniki zasadami termodynamiki nawet w tych przypadkach, gdy inne, poza mechaniczną, postacie energji odgrywają rolę drugorzędną. Tem większe znaczenie ma termodynamika przy rozpatrywaniu zjawisk, do których pojęcia mechaniczne można stosować jedynie pośrednio, dzięki różnym dodatkowym założeniom, jak np. w zjawiskach cieplnych, chemicznych i t. p. Wtedy zasady termodynamiki, wzory, wyprowadzone przez Helmholtza, Thomsona, Clausiusa stają się głów-

nem narzędziem badania. Przystosowanie tego narzędzia do poszczególnych zagadnień fizyki stanowi treść badań w tej dziedzinie, wykonanych w ciągu ostatnich dziesiątków lat.

Dalszy rozwój termodynamiki. — Spór o istotę teorji fizycznej. — Do badań zjawisk chemicznych pierwszy bodaj użył termodynamiki Kirchhoff (1858 r.), w znacznie większym zakresie uczynił to amerykański uczony Willard Gibbs (1839—1903) w szeregu znakomitych prac, ogłoszonych różnemi czasy, poczynając od 1876 r. Niezależnie od prac Gibbsa, początkowo mało znanych w Europie, Van't-Hoff i Helmholtz, pracując nad analogicznemi zagadnieniami, doszli w niektórych przypadkach do tych samych, co i on, wyników. Badania Massieu oraz nieco późniejsze prace Duhema, Plancka, z polskich zaś uczonych Władysława Natansona, dotyczyły głównie uogólnienia i pogłębienia podstawowych pojęć termodynamiki. Do dziedziny promieniowania zastosował je w 1884 r. Boltzmann, opierając na nich wywód odkrytego w 1879 r. przez Stefana związku między temperaturą bezwzględną ciała doskonale czarnego i całkowitą energją jego promieniowania.

W ostatnich latach (1906 r.) badania chemiczne doprowadziły wybitnego uczonego niemieckiego Waltera Nernsta do założenia, że w temperaturze zera bezwzględnego wszelkie przemiany zachodzą bez zmiany entropji układu. Założenie to, zbyt zdaje się pohopnie nazwane trzecią zasadą termodynamiki, może być według znakomitego fizyka holenderskiego H. A. Lorentza (1853—1927) zastąpione przez dwa inne: 1) ciepło atomowe ciał stałych i ciekłych staje się w miarę przybliżania do zera bezwzględnego znikomo małem oraz 2) temperatury zera bezwzględnego nie można otrzymać doświadczalnie. Pierwsze z tych założeń znalazło potwierdzenie we wzorach, ustalających zależność ciepła atomowego od temperatury i wyprowadzonych przez Einsteina (1911 r.), Debye'a (1912 r.) oraz Borna i Karmána (1912 r. i późniejsze lata), które naogół wykazały niezłą zgodność z doświadczeniem; drugie jednak założenie, a raczej wnioski, jakie z niego wynikają, nie zostało, jak dotychczas, w dostatecznej mierze poparte danemi doświadczalnemi.

Ale jednocześnie z rozwojem, a nawet, powiedzmy, rozkwitem termodynamiki zaczęło się odsuwać na plan drugi to, co Helmholtz uważał za ostateczny cel badań naukowych, sprowadzenie „zjawisk natury do niezmiennych sił przyciągających i odpychają-

cych, których natężenie zależy od odległości". Czyż bowiem wymagały dalszego uzasadnienia wzory, których słuszność potwierdzały coraz to nowe fakty doświadczalne? Czy stawiane im zarzuty nie zostały obalone? [1]) Czy wreszcie nie należało wobec tego uważać termodynamiki za urzeczywistnienie ideału owej teorji zupełnej, o której pisał Carnot? Na te pytania odpowiedział fizyk angielski Rankine (1820—1872) w słynnej rozprawie „Zarys nauki energetyki" (Outlines of the Science of Energetics), ogłoszonej w 1855 r. [2]). Według Rankine'a, badanie fizyczne przechodzi zawsze dwa kolejne okresy: w pierwszym ustala się wzory, bezpośrednio wyprowadzone z doświadczenia, w drugim wiąże się te wzory w teorję ogólną tak, aby fizyka przybrała postać nauki oderwanej. Tego uogólnienia, którego celem ostatecznym jest znalezienie możliwie prostego układu zasad, można dokonać w sposób dwojaki: przez użycie metody oderwanej (abstrakcyjnej) lub metody hipotetycznej. Używając pierwszej z tych metod, opisujemy daną grupę zjawisk przy pomocy zespołu tych własności, które są wspólne wszystkim zjawiskom, objętym przez daną grupę; używając drugiej metody, porównywujemy jedną grupę zjawisk z inną, której prawa są nam znane i którą bierzemy za model dla grupy badanej. Wzorem pierwszego sposobu postępowania jest dla Rankine'a, podobnie, jak dla Carnota, mechanika. Przedmiot badania — ciała materjalne są określone przez te własności, jakie możemy poznać zmysłami: zajmowanie pewnego miejsca w przestrzeni, opór, jaki stawiają ruchowi. Podobnie ze zjawiskami mechanicznemi — ruchami i siłami. Prawa mechaniki nie są niczem innem, jak doświadczeniem, ujętem we wzory. Ale stąd nie wynika, aby te same pojęcia, te same prawa przenosić do innej grupy zjawisk; byłoby to odstępstwem od ducha badań mechanicznych, tembardziej, że pojęcie energji jest pojęciem najogólniejszem z tych wszystkich, jakich nam dostarcza doświadczenie. Określenie przeto energji nie powinno i nie może zawierać w sobie pojęć mechanicznych [3]).

[1]) Najpoważniejsze zarzuty przeciwko drugiej zasadzie postawił Hirn. Krytyczne ich omówienie można znaleźć w książce: H. Poincaré. Thermodynamique. Wydanie 2-ie. Paris. Gauthier-Villars. 1908, str. 118—121.

[2]) Streszczenie jej podaję według książki: A. Rey. La théorie de la physique chez les physiciens contemporains. Paris. Alcan. 1923 r. str. 28—50.

[3]) Takie określenie dał już Rankine poprzednio (1853 r.). Energją, według niego, jest „każdy stan (affection — Helmholtz tłumaczy przez Zukommniss) substancji, który polega na sile wytwarzania zmian, przezwyciężających opór

Większe o wiele znaczenie, niż rozprawa Rankine'a, miały prace wybitnego filozofa i fizyka niemieckiego Ernesta Macha (1838—1916). Dla Macha „pogląd, że mechanikę należy uważać za podstawę wszystkich pozostałych dziedzin fizyki i że wszystkie procesy fizyczne należy objaśniać mechanicznie, jest... przesądem" [1].

Przesąd ten jest zrozumiały historycznie. „Rozwojowi [bowiem] mechanicznego poglądu na przyrodę sprzyjało wiele warunków. Po pierwsze, związek wszystkich procesów przyrody z procesami mechanicznemi jest niewątpliwy, a to skłania do objaśnienia mniej znanych procesów zapomocą lepiej znanych, mechanicznych. Następnie, w dziedzinie mechaniki zapoznano się po raz pierwszy z wielkiemi ogólnemi prawami, posiadającemi wybitne znaczenie" [2]. Takiem np. prawem jest zasada sił żywych. W postaci, którą jej nadał Helmholtz, nazywana jest często zasadą zachowania energji (potencjalnej — sił napięcia u Helmholtza, i ruchu — siły żywej). Tego jednak, że w wyniku pracy można otrzymać nietylko zwiększenie siły żywej, lecz również pewną ilość ciepła lub zwiększenie potencjału elektrycznego, nie możemy uważać za wyraz „procesu mechanicznego, leżącego u podstawy wszystkich zjawisk przyrody. Nie jest to nic innego, jak stwierdzenie niezmiennego ilościowego związku między procesami mechanicznemi i innemi". Badanie naukowe jest wcześniejsze od mechanicznego poglądu na przyrodę. Zanim powstała mechanika, „Galileusz i Huygens stale przechodzili od rozpatrywania poszczególnych zjawisk do rozpatrywania wielkiej całości, i dążąc do prostego i wolnego od sprzeczności punktu widzenia, doszli do wielkich wyników" [3]. „Gdy Carnot znajduje, że ilość ciepła Q, spadająca z wyższej temperatury t do niższej t_1, przy wykonywaniu pracy L, zależy tylko od temperatury, nie zależy zaś od rodzaju ciał, myśli zgodnie z metodą Galileusza. Za tą metodą idzie również J. R. Mayer, ustalając swą zasadę równoważności ciepła i pracy. Mechaniczny pogląd na przyrodę jest mu obcy, nie potrzebuje go wcale". W dodatku, mechaniczne hipotezy utrudniają osiągnięcie właściwego celu nauki. „Zadaniem całej nauki

---

lub jest z nią porównywalny". Patrz M. Planck. Das Prinzip der Erhaltung der Energie. Wydanie 2-ie. Teubner. Berlin. 1908, str. 77.

[1]) E. Mach. Mechanika. Historyczno-krytyczny zarys jej rozwoju. Tłum. na język rosyjski przez G. A. Kotlara pod redakcją N. A. Gezechusa. Petersburg, 1909 r. str. 416.

[2]) l. c. str. 419.

[3]) l. c. str. 420.

i każdej nauki jest zastąpienie doświadczenia lub zaoszczędzenie (Oekonomie) go przez odtworzenie i odwzorowanie (Vorbildung) faktów w naszej myśli. Doświadczenie, odtworzone w myśli, jest bardziej dostępne, niż rzeczywiste doświadczenie, i w pewnych przypadkach może je zastąpić. Ta oszczędnościowa (ekonomiczna) rola nauki, przenikająca całą jej istotę, jasno wynika z najogólniejszych nawet rozważań"[1]. Otóż „podobnie do pojęcia substancji zasady zachowania posiadają swoją poważną podstawę w oszczędności myślenia. Wyłączna, niczem nie związana zmiana, bez mocnego punktu oparcia, nie jest określona i nie może być odtworzona. Zjawia się więc pytanie, jakie pojęcie można zachować przy zmianie, jako czegoś, co pozostaje, jakie istnieje prawo, jakie równanie się spełnia, jakie wielkości pozostają stałemi. Gdy mówimy, że we wszelkich załamaniach współczynnik załamania pozostaje stałym, że we wszelkich ruchach ciał ciężkich *g* pozostaje równem 9,81 m., że w każdym układzie odosobnionym energja pozostaje stałą, to wszystkie te twierdzenia mają tę samą rolę oszczędnościową — ułatwienie odtworzenia faktów w myśli"[2]. Temu warunkowi nie czynią zadość hipotezy mechaniczne. „Gdyby nawet jakaś hipoteza okazała się zupełnie wystarczającą do wyobrażenia pewnej dziedziny zjawisk, np. cieplnych, na miejsce faktycznego stosunku między procesami mechanicznemi i cieplnemi postawilibyśmy hipotezę. Ilość faktów podstawowych zastępujemy równie wielką ilością hipotez"[3]. Ideałem więc, „do którego zbliża się... asymptotycznie" każde ujęcie (Darstellung) naukowe, jest „zupełny, przejrzysty spis (Inventar) faktów danej dziedziny"[4]. Wzór takiego „spisu" widzi M a c h, podobnie, jak C a r n o t, podobnie, jak R a n k i n e, w „równaniach d'A l e m b e r t a (lub L a g r a n g e'a), które obejmują wszystkie możliwe fakty dynamiczne, w równaniach F o u r i e r a, które obejmują wszystkie, jakie tylko można pomyśleć fakty przewodzenia ciepła"[5].

Poglądy swoje M a c h po raz pierwszy wyłożył w krótkiej rozprawie „o określeniu masy", ogłoszonej w 1867 r., w kilka lat później (1874 r.) K i r c h h o f f zastosował je do rozpatrzenia zasad mechaniki; znacznie później, kiedy już poglądy M a c h a zostały spopularyzowane przez A v e n a r i u s a i S t a l l o, oparł na

---

[1] l. c. str. 402.
[2] l. c. str. 424.
[3] l. c. str. 419.
[4] E. M a c h. Prinzipien der Wärmelehre — str. 461.
[5] l. c. str. 461 i 462.

nich znany uczony niemiecki Wilhelm Ostwald swe uzasadnienie energetyki[1]. Równoważność różnych postaci energij nie dowodzi, według Ostwalda, aby należało je sprowadzić do jednej tylko postaci; wręcz przeciwnie, wskazuje ona na to, że wszystkie one są w tej samej płaszczyźnie. Pojęcie energji jest pojęciem pierwotnem, które dopiero dzięki doświadczeniu rozpada się na różne rodzaje, posiadające jedną cechę wspólną, a mianowicie, że każdą z nich możemy uważać za iloczyn dwu czynników: czynnika natężenia, jak ciśnienie, wysokość spadku, potencjał, temperatura i t. d., i czynnika pojemności, jak objętość, ciężar, nabój elektryczny i t. d. Czynnik pojemności wyrażony jest zawsze przez wielkość, którą możemy dodać do innej wielkości tego samego rodzaju, a więc zmierzyć w zwykłem tego słowa znaczeniu; czynnik natężenia wyraża pewien poziom, na którym znajduje się czynnik pojemności; poziomów tych „mierzyć" nie możemy, możemy je tylko wyznaczać na skali. Masa jest czynnikiem pojemności w wyrażeniu energji ruchu. Nie podpada ona pod nasze zmysły. „Nasze [bowiem] wrażenia zmysłowe posiadają pewną cechę wspólną i tylko jedną: odpowiadają różnicy energji między naszemi organami zmysłów i środowiskiem, które je otacza". Cechą materji nie jest nawet przestrzenność, gdyż przestrzeń, którą ona zajmuje, poznajemy „przez zużycie energji potrzebnej, aby do niej przeniknąć. Materja jest jedynie zespołem różnych energij, zestawionych razem w przestrzeni, i wszystko, co o niej będziemy chcieli powiedzieć, będziemy mówili tylko o tych energjach". „Obraz żaden nie jest potrzebny, ani żaden symbol", gdyż może zniekształcić zjawiska. Rola nauki polega na ustaleniu takiego związku między rzeczywistościami doświadczalnemi, „aby, gdy jedne z nich są dane, inne z nich wynikały". Temi zaś rzeczywistościami są przekształcenia energji, zmiany energji, pojemność energji. „Idąc tą drogą energetyki, damy właściwą odpowiedź na wezwanie Kirchhorffa, tak często źle tłumaczone: rzekomemu wyjaśnieniu faktów należy przeciwstawić opisanie faktów". Kierując się temi wskazaniami, Ostwald wyraża zasadę Carnota w sposób następujący: „Aby coś zaszło, trzeba, aby gdzieś istniały niewyrównane różnice natężenia"[2].

---

[1]) Prace Ostwalda przytaczam według A. Reya. La Théorie physique i t. d. str. 96—102 oraz według B. Brunhes'a. La dégradation de l'énergie. Paris. Flammarion. 1908, str. 290—292.

[2]) B. Brunhes. La dégradation de l'énergie — str. 292.

We Francji wyrazicielem podobnych poglądów był wybitny uczony i znakomity znawca historji nauki Piotr Duhem[1]. „Hipoteza, że wszystkie zjawiska dają się wyjaśnić mechanicznie, nie jest ani prawdziwa, ani fałszywa; nie ma ona dla niego [fizyka] żadnego znaczenia"[2]. „Ten, kto trzyma się postępowania metody doświadczalnej, nie może uznać za prawdziwe następującego orzeczenia: wszystkie zjawiska fizyczne wyjaśniają się mechanicznie. Nie można również uznać tego orzeczenia za fałszywe"[3]. Leży ono bowiem poza granicami badania fizycznego. Dążenie do mechanicznego objaśnienia zjawisk przyrody można wyjaśnić istnieniem „umysłów imaginacyjnych", które dopiero wtedy są zadowolone, „skoro wszystkie różne jakości ciał, przystępne jedynie rozważaniu abstrakcyjnemu i przedstawieniu liczbowemu, zastąpi[ą] przez kombinację figur, uchwytnych dla intuicji geometrycznej i dających się wykreślać"[4]. Ale to nie ma nic wspólnego z badaniem naukowem: „Tym, którzy chcą, aby ich teorje wyjaśniły istotę i przyczyny praw fizycznych, przeciwstawmy tego, który szuka w fizyce teoretycznej tylko symbolu tych praw; nie ograniczy on zgóry liczby i rodzaju pojęć, które będzie mu dozwolone łączyć ze sobą, dopuści do swego układu i inne wielkości poza wielkościami geometrji i mechaniki; gdy pewna wielkość będzie ściśle określona, gdy będą ustalone w sposób ścisły prawidła, według których powinna być ona używana w rozumowaniach i rachunkach, mierzona w doświadczeniu, nie uchyli się przed jej używaniem; jeżeli hipotezy, dotyczące tej wielkości, pozwolą dobrze odtworzyć klasę badanych zjawisk, umysł jego będzie zadowolony; nie będzie tracił czasu i wysiłków na zastąpienie tego pojęcia przez zestawienie pojęć geometrycznych i mechanicznych"[5].

Tym głęboko uzasadnionym zarzutom zwolennicy mechanicznego pojmowania zjawisk mogli przeciwstawić niewiele argumentów, ale zato argumenty te miały szczególną wagę.

Przedewszystkiem jest faktem niejednokrotnie stwierdzonym, któremu nigdy nie próbowali przeczyć nawet przeciwnicy mechanicz-

---

[1]) Należy jednak zaznaczyć wysoce krytyczne i zlekka ironiczne oświetlenie poglądów Ostwalda przez Duhema w „Ewolucji mechaniki". Przekład polski. Warszawa, 1904, str. 115—117.

[2]) „Ewolucja mechaniki", str. 119.

[3]) l. c. str. 120.

[4]) l. c. str. 123.

[5]) A. Rey. La théorie physique i t. d. str. 119.

nego pojmowania[1]), że hipotezy mechaniczne często ułatwiały zrozumienie nowych faktów, podstawiając na ich miejsce znane nam pojęcia". Co więcej, istnienie owych „umysłów imaginacyjnych", o których pisał Duhem, sprawia, że często nowe odkrycia mogą być dokonane tylko dzięki takim „roboczym" hipotezom. Wyżej już była mowa o roli, jaką prawdopodobnie odegrała w rozumowaniach Carnota analogja między ciepłem, przechodzącem z ogniska do chłodnicy, a wodą, spadającą z wyższego poziomu na niższy; William Thomson zupełnie wyraźnie stwierdzał, że nie jest nigdy zadowolony, dopóki nie może zbudować mechanicznego modelu danego zjawiska; „gdy mogę zbudować model mechaniczny, rozumiem, gdy nie mogę zbudować modelu mechanicznego, nie rozumiem"; w tym samym mniej więcej czasie, gdy ukazywały się prace Macha, James Clerck Maxwell (p. elektryczność) takim właśnie modelem mechanicznym posługiwał się do wyprowadzenia swych słynnych równań pola elektromagnetycznego, które miały stanowić nową epokę w dziejach fizyki. Ale ten argument, aczkolwiek przekonywujący, byłby nieco powierzchowny i mógłby doprowadzić do wniosku, jaki zresztą wyciągnął z niego Mach, że z chwilą, gdy hipoteza mechaniczna rolę swoją odegrała, „skuteczność jej jest wyczerpana".

Istniało głębsze uzasadnienie mechanicznego pojmowania zjawisk przyrody. Nie jest rzeczą przypadku, że praca Helmholtza „O zachowaniu siły", dająca mechaniczne podstawy zasadzie zachowania energji, była dla wielu fizyków decydującym dowodem słuszności twierdzenia o równoważności ciepła i pracy, że Séguin uważał pracę Joule'a za stwierdzającą tożsamość ruchu i cieplika[2]), że Clausius prace swoje z termodynamiki opatrzył tytułem „mechaniczna teorja ciepła" (die mechanische Wärmetheorie), że pierwsza rozprawa (1851 r.) Rankine'a z tej dziedziny nosiła tytuł podobny, że Thomson pisał o „dynamicznej teorji ciepła" (dynamical theory of heat) i wielkość, którą dzisiaj nazywamy energją wewnętrzną, nazywał „całkowitą energją mechaniczną" ciała, że Hirn wydał w 1862 r. książkę p. t. „Wykład analityczny i doświadczalny teorji mechanicznej ciepła" i t. d.

---

[1]) Por. E. Mach. Mechanika, l. c. str. 419.

[2]) Praca jego nosiła tytuł: „Notatka na poparcie poglądu p. Joule'a o tożsamości ruchu i cieplika". (Note à l'appui de l'opinion de Mr. Joule sur l'identité du mouvement et du calorique. 1847).

Nie miało to nic wspólnego z „modelami mechanicznemi". W przedmowie do mechaniki Hertza pisał Helmholtz: „Fizycy angielscy, jak lord Kelvin (W. Thomson), w swej teorji atomów - wirów, jak i Maxwell, obmyślający układ komórek o wirującej zawartości, stanowiący podstawę jego próby mechanicznego wyjaśnienia zjawisk elektromagnetycznych, znajdowali widocznie w takich wyjaśnieniach zadowolenie większe, aniżeli w przedstawianiu ogólnem faktów i ich praw przy pomocy układów różniczkowych fizyki. Co się mnie tyczy, to muszę wyznać, że dotąd trzymałem się tego drugiego sposobu przedstawienia i czułem się wtedy najpewniejszy; atoli nie mam żadnych zasadniczych zarzutów przeciwko metodzie, jakiej trzymali się wymienieni wybitni fizycy" [1]).

Dla badaczy typu Helmholtza wyjaśnienie mechaniczne [2]) zjawisk przyrody nie było hypotezą „roboczą", mniej lub więcej udatnym „modelem", lecz ostatecznym celem nauki; było spełnieniem tego zadania, które stanęło przed fizyką bodaj w chwili jej powstawania, gdy w V wieku przed Nar. Chr. Demokryt z Abdery układał swą „Rozprawę o wszechświecie".

To też argumenty przeciwników nie zdołały zachwiać poglądów zwolenników mechanicznej teorji. W głośnym odczycie, wypowiedzianym w 1881 r., przyjaciel Helmholtza, fizjolog Emil du Bois-Reymond, stwierdzał, że „nauka przyrodnicza — lub, mówiąc ściśle, naukowe poznanie przyrody lub poznanie świata materjalnego z pomocą i w znaczeniu fizyki teoretycznej — jest sprowadzeniem zmian w świecie materjalnym do ruchów atomów, spowodowanych przez siły środkowe, niezależne od czasu, to znaczy sprowadzenie zjawisk przyrody do mechaniki atomistycznej. Jest faktem psychologicznym, że gdy tego rodzaju sprowadzenia dokonamy z powodzeniem, nasza potrzeba przyczynowości jest chwilowo całkowicie zaspokojona. Twierdzenia mechaniki można wyrazić w postaci matematycznej i wtedy posiadają one tę samą pewność apodyktyczną, co twierdzenia matematyczne... Pogląd Kanta we wstępie do „Podstaw metafizycznych nauki przyrody", że każda gałąź nauk fizycznych tyle zawiera nauki, w ścisłem tego słowa zna-

---

[1]) P. Duhem. Ewolucja mechaniki, str. 127.

[2]) Należy zaznaczyć, że słowo „mechaniczne" obejmuje zazwyczaj dwa pojęcia „dynamiczne" i „kinematyczne". Klasyczna teorja atomowa może służyć jako przykład teorji „dynamicznej", teorja wirów Descartes'a, jako przykład teorji „kinematycznej". Teorje współczesne zbliżają się raczej do tego drugiego typu.

czeniu, ile jest w niej matematyki", musi być sformułowany dokładniej przez zastąpienie „matematyki" „mechaniką atomistyczną" [1]).

W rozprawie, ogłoszonej w 1875 r., p. t. „O dynamicznym dowodzie drobinowej budowy sił przyrody" (On the dynamical Evidence of the molecular Constitution of Bodies) Maxwell pisał: „Gdy możemy całkowicie opisać zjawisko fizyczne, jako zmianę w rozmieszczeniu i ruchu układu materjalnego, mówimy, że wyjaśnienie dynamiczne tego zjawiska jest całkowite. Nie możemy pojąć, aby było potrzebne lub możliwe dalsze wyjaśnienie, z chwilą bowiem, gdy wiemy, co oznaczają słowa rozmieszczenie, masa i siła, widzimy, że pojęcia, którym one odpowiadają, są tak elementarne, że już przez nic innego nie mogą być wyjaśnione" [2]).

W kilka lat potem (w 1884 r. i 1886 r.) pokusił się Helmholtz dać w dwu pracach „statyka układów monocyklicznych" i „zasada najmniejszego działania" wyjaśnienie mechaniczne drugiej zasady termodynamiki, podobnie, jak to dla pierwszej zasady uczynił w pracy „O zachowaniu siły". Tym razem zadanie było niepomiernie trudniejsze. Zasadę bowiem zachowania energji można było uważać do pewnego stopnia za uogólnienie zasady zachowania siły żywej; z drugą zasadą postąpić tak nie było można, gdyż analogicznej zasady mechanika nie posiada. To też Helmholtz zmuszony był uciec się do obmyślenia szczególnych układów mechanicznych, w których parametry, wyznaczające stan mechaniczny układu, byłyby dwojakiego rodzaju: jedne zmieniające się bardzo szybko i inne zmieniające się bardzo powoli [3]). Rozważania Helmholtza, bardzo zresztą cenne dla mechaniki i rozwinięte później przez Hertza, nie dały jednak pożądanych wyników. Wzory Helmholtza nie mogły wyjaśnić wzrastania entropji w przemianach nieodwracalnych i tem samem drugiej zasady termodynamiki. Wyjaśnienie mechaniczne dała dopiero kinetyczna teorja gazów.

---

[1]) J. B. Stallo. La matière et la physique moderne. 2-ie wydanie. Paryż. Alcan. 1891 r. str. 6.

[2]) J. B. Stallo. l. c. str. 4.

[3]) Przykładem takiego układu może być blok, obracający się koło nieruchomej osi. Parametrem szybko zmieniającym się będzie kąt, jaki tworzy płaszczyzna, przechodząca przez oś bloku i jeden z jego punktów obwodu, z pewną płaszczyzną stałą. Taki układ o jednym parametrze szybkozmiennym nazywa Helmholtz monocyklicznym.

KINETYCZNA TEORJA GAZÓW I CIECZY

OPRACOWAŁ

W. WERNER

PODSTAWY TEORJI. — DALSZY JEJ ROZWÓJ. — DRUGA ZASADA TERMODYNAMIKI. — DOŚWIADCZALNE DOWODY ISTNIENIA RUCHÓW DROBINOWYCH.

Rozdział I.

PODSTAWY TEORJI.

HIPOTEZA budowy materji z atomów sięga niemal kolebki myśli ludzkiej, gdyż została już wypowiedziana w w. V przed N. Chr. przez dwóch filozofów greckich Leukippa i Demokryta (ob. str. 5); twierdzili oni, że ciała składają się z niepodzielnych, niezmiennych cząstek, z atomów, różniących się od siebie tylko własnościami geometrycznemi.

W czasach nowożytnych hipotezę atomistyczną wznowił francuski matematyk i astronom Piotr Gassendi (1592 — 1655), który, pomiędzy innemi, wyraził przypuszczenie, że ciepło polega na gwałtownych, lecz niewidzialnych ruchach atomów, oraz że atomy mogą się łączyć po kilka w większe grupy (molekuły, drobiny). Pierwszy jasny pogląd na rodzaj ruchów molekularnych wypowiedział szwajcarski fizyk i matematyk Daniel Bernoulli (1700 — 1782). Zakładał, że atomy gazu są to niezmiernie drobne kulki sprężyste o objętości znikomo małej w porównaniu z całkowitą objętością gazu; uderzenia tych kulek - atomów o ścianki naczynia wytwarzają ciśnienie na te ścianki; rozpatrywał, jak zmieni się ciśnienie, gdy jeden z wymiarów sześciennego naczynia zmaleje w określonym stosunku, i tą drogą wyprowadził ze swych założeń prawo Boyle'a - Mariotte'a.

Poglądy zarówno Gassendi'ego, jak Bernoulli'ego nie znalazły oddźwięku i poszły w zapomnienie. Nowym impulsem, który ożywił kinetyczną teorję materji, było odkrycie równoważności ciepła i pracy. Nazwa „mechanicznej teorji ciepła", jaką nadano opartej na zasadzie równoważności termodynamice, wskazuje wyraźnie, że nie chciano zadowolić się doświadczalnem stwierdzeniem zasady, lecz poszukiwano wytłumaczenia jej na gruncie mechaniki. Utożsamienie energji cieplnej z energją ruchów drobinowych narzucało się samo przez się. Proste prawa, rządzące stanem gazowym sprawiły, że na

tem polu osiągnięto wyniki ilościowe, wykraczające poza ogólnikowe twierdzenia — z hipotezy wyprowadzono teorję, która następnie rozwinęła się szeroko i sięgnęła w samą głąb zagadnień fizyki, przekształcając do gruntu poglądy naukowe na budowę materji, — a w konsekwencji na budowę elektryczności i energji.

Pierwszy krok w rozwoju kinetycznej teorji materji, a gazów w szczególności, uczynił Joule (1851). W kilka lat później (1856) Krönig, a w rok potem Clausius nadali teorji postać zdecydowaną, która uległa późniejszemu rozwojowi, nie zmieniając zasadniczych założeń. (Bliższe wiadomości o Joule'u i Clausius'ie ob. dział Ciepła).

DR. A. KRÖNIG

Zarys teorji gazów[1].

Mechaniczna teorja ciepła utrzymuje, że ciepło ciała polega nie na czem innem, jak na ruchu jego części najdrobniejszych. Brak atoli jasnego poglądu na to, jakiego ten ruch jest rodzaju... W stosunku do ciał gazowych chcę wyłożyć następującą hipotezę.

Gazy składają się z atomów, zachowujących się jak kule stałe, doskonale sprężyste, poruszające się w próżnej przestrzeni z pewną prędkością. Ciała stałe i ciekłe zachowują się w stosunku do uderzeń atomów gazowych również jak doskonale sprężyste, skoro tylko nastąpi równowaga lub stan stateczny...

Atom gazu nie drga zatem około położenia równowagi, lecz porusza się po linji prostej z prędkością jednostajną, dopóki nie uderzy o inny atom lub o ścianę. W szczególności niema odpychania pomiędzy dwoma atomami, które się nie stykają z sobą.

W stosunku do atomów musimy najgładszą ścianę uważać za chropowatą a tor każdego atomu za tak nieprawidłowy, że będzie się usuwał z pod obliczeń. Lecz na podstawie praw prawdopodobieństwa, będziemy mogli, zamiast tej zupełnej nieprawidłowości, przyjąć doskonałą prawidłowość.

Niechaj naczynie prostopadłościenne, o ścianach płaskich i wymiarach x, y, z, zawiera n atomów, każdy o masie m; podzielmy przestrzeń, objętą naczyniem, na $\frac{1}{6}n$ jednakowych sześcianów. Niechaj każdy z tych sześcianów zawiera w pewnej oznaczonej chwili 6 ato-

---

[1]) Grundzüge einer Theorie der Gase. Ann. der Ph. u. Ch. t. 99, 1856 r.

mów, które poruszają się w kierunkach $+x$, $-x$, $+y$, $-y$, $+z$, $-z$ ze wspólną prędkością c. Załóżmy, że atomy nie wpływają na siebie wzajemnie i poruszają się bez przeszkód aż do jednej ze ścian (atomy, których punkty środkowe poruszają się wdłuż jednej i tej samej prostej, zachowują się tak, jakby rzeczywiście nie wpływały na siebie, gdyż przy każdem zderzeniu wymieniają pomiędzy sobą prędkości). Chodzi o wyznaczenie ciśnienia, jakiego doznaje jedna ze ścian, np. yz ze strony gazu.

Ciśnienie to będzie wywołane przez uderzenia atomów gazu o ścianę. Gdyby uderzał tylko jeden atom, ciśnienie byłoby $m. c. a.$, gdzie a oznacza liczbę uderzeń w ciągu jednostki czasu. Atom, który porusza się prostopadle do yz, to znaczy równolegle do x, uderza o ścianę za każdym razem po przebieżeniu drogi $2x$; zatem $a = \frac{c}{2x}$. Aby znaleźć całkowite ciśnienie P [parcie] na ścianę yz, należy pomnożyć mca przez liczbę atomów, poruszających się równolegle do x; ponieważ z 6 atomów 2 poruszają się w kierunku x, liczba ta wynosi $\frac{n}{3}$. Zatem $P = mc\frac{c}{2x}\cdot\frac{n}{3}$. Jeśli przez p oznaczymy ciśnienie na jednostkę powierzchni ściany yz, to będzie $p = mc\frac{c}{2x}\cdot\frac{n}{3}\cdot\frac{1}{yz}$, albo, oznaczając $xyz = v$ i opuszczając stały spółczynnik:

$$p = \frac{nmc^2}{v}.$$

To wyrażenie wskazuje, że ciśnienie na jednostkę powierzchni jest jednakowe dla wszystkich ścian, i że jest ono odwrotnie proporcjonalne do objętości, jak to głosi prawo M a r i o t t e'a.

[K r ö n i g popełnia w swoich wywodach dwa błędy, które usunął C l a u s i u s. Swobodne ruchy przypisuje atomom gazu; tymczasem chemiczna budowa gazów zmusza do poglądu, że atomy łączą się w drobiny (molekuły), i tym dopiero możemy przypisać ruchy, niezależne od innych drobin. Powtóre, przyjmuje jako udział każdego atomu w ciśnieniu gazu iloczyn mc, nie dając na to dowodu, ani nie wskazując drogi, w jaki sposób można przejść od uderzeń poszczególnych atomów do ciągłego ciśnienia gazu na ścianki. Drogę tę wskazał C l a u s i u s, rozważając zmianę pędu atomu (raczej drobiny). Jeśli atom o masie m pada prostopadle na ściankę z prędkością c, to zostaje odbity z prędkością $-c$ w kierunku przeciwnym; zmiana prędkości wynosi więc $2c$, a związana z tem zmiana pędu jest $2mc$. Jeśli $\frac{n}{3}$ atomów uderza ściankę każdy a razy na sekundę, to wszystkie razem doznają w sekundzie zmiany

pędu równej $\frac{2}{3}$ *namc*. Siły, potrzebnej do tego, dostarcza ścianka. Zasada równości pędu i popędu $\{m(c_1-c_2)=ft\}$ poucza, że miarą siły jest zmiana pędu, przypadająca na jednostkę czasu. Zatem, parcie gazu na ściankę wyniesie $P=\frac{2}{3}namc$, zamiast $\frac{1}{3}$ *namc*. Ciśnienie będzie równe $p=\frac{1}{3}\frac{nmc^2}{v}$, podczas gdy u K r ö n i g a, po obliczeniu opuszczonego spółczynnika liczbowego, wynosiłoby $\frac{1}{6}\frac{nmc^2}{v}$].

Do przyjętych dotychczas założeń muszę dodać jedno jeszcze, że iloczyn mc^2, czyli siła żywa [energja kinetyczna] atomu jest poprostu temperaturą, liczoną od zera bezwzględnego.

Według prawa G a y - L u s s a c'a gaz przy —273°C nie wywiera żadnego ciśnienia, natomiast w temperaturze o T° wyższej [1]) — ciśnienie proporcjonalne do T (o ile mianowicie objętość pozostaje stała).

To samo wynika ze wzoru

$$p=\frac{nT}{v}$$

który wynika z poprzedniego, gdy założymy $mc^2=T$ [u Clausiusa $\frac{1}{2}mc^2=T$].

Dla $p_1=p_2$, $T_1=T_2$ i $v_1=v_2$ wynika $n_1=n_2$, to znaczy że różne gazy zawierają w równych temperaturach, pod równemi ciśnieniami i w równych objętościach jednakowe liczby atomów [powinno być: jednakowe liczby cząsteczek; prawo A v o g a d r y].

Z tego wynika bezpośrednio, że masa atomu jest proporcjonalna do ciężaru właściwego gazu...

Dotychczas rozpatrywałem gazy w naczyniach zamkniętych i nie zwracałem uwagi na wpływ ciężkości na ich atomy. Teraz obliczę ciśnienie, jakie wywiera pojedyńczy atom na powierzchnię ziemi Można bowiem przypuszczać, że ciśnienie to rośnie wraz z ciepłem atomu.

Atom opuszcza powierzchnię ziemi w chwili O, z prędkością, której składowa pionowa wynosi c. Po czasie $\frac{c}{g}$ atom osiągnie najwyższy punkt swej drogi, z prędkością O; po czasie $\frac{2c}{g}$ powróci do ziemi z prędkością c. W ciągu jednostki czasu uderzy o ziemię $\frac{g}{2c}$ razy z prędkością c; zatem jego ciśnienie na ziemię, czyli jego ciężar, będzie $= mc\frac{g}{2c}=\frac{mg}{2}$, niezależnie od prędkości, zatem niezależnie od temperatury.

---

[1]) Użyty przez autora znak t zastąpiliśmy przez T duże, aby uzgodnić jego wzory z przyjętem dziś powszechnie znakowaniem.

W podobny sposób autor wykazuje, że wywołana ciężkością różnica parć, wywieranych przez atomy gazu na górną i dolną ściankę poziomą naczynia, wynosi $\frac{nmg}{2}$.

[Zgodnie z uwagę na str. 355, musimy wyniki obliczeń K r ö n i g a pomnożyć przez 2; obliczone wielkości wyniosą: „ciśnienie" atomu na ziemię *mg*, różnica parć gazu *nmg*, w obu wypadkach równe rzeczywistemu ciężarowi atomu, wzgl. wszystkich atomów, zawartych w naczyniu].

Jeśli temperatura gazu jest równa sile żywej [energji kinetycznej] atomu gazu, to ilość ciepła Q, zawarta w gazie, musi być równa sile żywej wszystkich atomów. Jest więc $Q = nmc^2$, albo $Q = nT$. Wynika stąd, że jeśli będziemy ilość gazu określali liczbą atomów n, to w równych ilościach gazu, pod równem ciśnieniem — w równej temperaturze, równe objętości gazu zawierają równe ilości ciepła...

Zmianie T o 1^0 odpowiada ta sama ilość ciepła, jeśli n jest niezmienione; jeśli jako n przyjmiemy liczbę drobin różnych gazów, to równym liczbom n będą odpowiadały równe objętości gazu (w tej samej temperaturze i pod tem samem ciśnieniem). Więc ilość ciepła, potrzebna do ogrzania jednakowych objętości różnych gazów o 1^0 jest taka sama dla różnych gazów, nie zależy od ich składu chemicznego.

[Jeśli weźmiemy *mole* gazów, t. j. masy, równe liczbowo ich ciężarom drobinowym (np. 2 gr. wodoru, 32 gr. tlenu, 44 gr. dwutlenku węgla i t. p.), to zajmą one, zgodnie z prawem A v o g a d r y, jednakowe objętości, i wymagać będą tej samej ilości ciepła do podniesienia swej temperatury o 1^0. Ta ilość ciepła nosi nazwę c i e p ł a d r o b i n o w e g o (molekularnego) i powinna być jednakowa dla wszystkich gazów. Prawo to sprawdza się, jak tego można się spodziewać, dla gazów, które chemja uważa za jednoatomowe t. j. dla takich, których drobiny składają się każda z jednego tylko atomu. Zaliczamy tu wszystkie gazy szlachetne (hel, argon etc.) oraz pary niektórych metali (rtęci, sodu). Dla wszystkich tych gazów istotnie wartości ciepła drobinowego wahają się w bardzo wąskich granicach — od 2.98 do 3.00.

Gdy drobina jest zbudowana z większej liczby atomów, może, prócz ruchów postępowych, podlegać innym jeszcze ruchom, np. wahaniom atomów wewnątrz drobiny. Ponieważ temperatura zależy tylko od energji ruchów postępowych całych drobin, przeto na podniesienie temperatury o 1^0 potrzeba teraz więcej energji, t. j. więcej ciepła, niż w gazach jednoatomowych: do energji ruchów postępowych dodaje się energja ruchów wahadłowych. Ciepło drobinowe gazu musi być większe i to tem większe, im bardziej złożona jest budowa drobiny. Wyniki pomiarów potwierdzają te przewidywania. Gazy dwuatomowe mają wartości mniej więcej zbliżone do siebie: wodór (H_2) — 4.90, tlen (O_2) i azot (N_2) — po 4.96, tlenek węgla (CO) — 5.00. Z gazów trójatomowych para wodna (H_2O) ma ciepło drobinowe 6.15, dwutlenek węgla (CO_2) — 6.87. Benzol (C_6H_6), ciało o złożonej budowie, ma wartość 23.3].

RUDOLF CLAUSIUS zaraz w następnym, 1857 roku ogłosił rozprawę p. t. „O rodzaju ruchu, który nazywamy ciepłem", gdzie uzupełnia, poprawia i pogłębia wywody K r ö n i g a. W wyprowadzeniu wzoru na ciśnienie uwalnia się od założenia, że prędkości atomów mają być skierowane równolegle do 3 krawędzi prostopadłościanu i, uogólniając dowodzenie na kierunki dowolne, dochodzi do wzoru takiego samego, jak K r ö n i g, ale pomnożonego przez 2 (ob. uw. na str. 355). Kilka dalszych uzupełnień poznamy z przytoczonych wyjątków.

O rodzaju ruchu, który nazywamy ciepłem [1]).

5. To cośmy powiedzieli dotychczas, stosuje się tylko do gazów trwałych, a i do tych tylko w przybliżeniu. Przyczynę nieznacznych odchyleń można, przynajmniej w sposób ogólny, dostrzec bez trudu. Aby prawo M a r i o t t e'a i G a y - L u s s a c'a i prawa z niemi bezpośrednio związane stosowały się ściśle, gaz musi spełniać następujące warunki w stosunku do swej budowy molekularnej.

1) Objętość, którą drobiny gazu rzeczywiście wypełniają, musi być znikomo mała w porównaniu z objętością, zajmowaną przez gaz.

2) Czas uderzenia, czyli ten czas, którego wymaga drobina zderzająca się ze ścianą lub inną drobiną, aby zmienić swą prędkość musi być znikomo mały wobec czasu, jaki upływa pomiędzy dwoma zderzeniami. Wpływ sił molekularnych musi być znikomo mały. Ten warunek ma podwójne znaczenie. Przedewszystkiem siły, z jakiemi drobiny przyciągają się nawzajem ze średnich odległości, muszą znikać wobec siły rozprężliwości, wywołanej ruchem drobin. Lecz drobiny nie znajdują się wciąż w średnich odległościach od siebie, lecz często w czasie ruchu drobina dobiega bezpośrednio do innej drobiny, lub też do stałej ściany, która też składa się z czynnych drobin; w tych chwilach występuje oczywiście działanie sił drobinowych. Drugi z wymienionych warunków wymaga właśnie, aby te części drogi molekuły, na których siły owe wywierają wpływ, zmieniając uchwytnie kierunek i prędkość ruchu molekuły, były znikomo małe wobec tych części, na których siły owe możemy uważać za nieistniejące...

6... Ruchy drobin zachodzą we wszystkich trzech stanach skupienia. W stanie *stałym* ruch polega na tem, że drobiny poruszają się około pewnych położeń równowagi, lecz nie opuszczają ich całko-

---

[1]) Ueber die Art der Bewegung, die wir Wärme nennen", Pogg. Ann. d. Ph. u. Ch. t. 100, r. 1857.

wicie, o ile tego nie sprawią jakieś siły obce. Ruch w ciałach stałych można więc nazwać ruchem drgającym...

W stanie *ciekłym* drobiny nie mają już określonych położeń równowagi... Jednak działanie ruchu, kóre rozłącza drobiny od siebie, jest niedość silne na to, aby je od siebie całkowicie oddzielić. Drobina nie przylega do jakichś określonych drobin sąsiednich, lecz może je opuścić; czyni to jednak nie sama przez się, lecz przy współudziale sił, wywieranych przez inne drobiny, poczem układa się względem nich tak, jak to czyniła z uprzedniemi swemi sąsiadkami.

Wreszcie w stanie *gazowym* drobiny wyszły ze sfer wzajemnego przyciągania i lecą w linji prostej według zwykłych praw ruchu. Gdy dwie takie drobiny się spotkają, rozbiegają się naogół równie gwałtownie, jak wpadały na siebie...

7. Szczególnie interesującem wydawało mi się zjawisko *parowania;* starałem się zdać sobie z niego sprawę w sposób następujący.

Mówiliśmy, że drobina cieczy, poruszając się, pozostaje w sferze działania drobin sąsiednich, a opuszcza je tylko wtedy, gdy przechodzi w podobne położenie względem innych drobin. To stosuje się jednak tylko do ruchów średnich, a należy przypuszczać, że wobec nieregularności ruchów, prędkości poszczególnych drobin odchylają się w szerokich granicach w obie strony od wartości średniej [1]).

Rozpatrzmy powierzchnię jakiejś cieczy; zakładam, że, przy różnorodności ruchów, od czasu do czasu może się zdarzyć, iż wskutek przyjaznego zbiegu działań ruchu postępowego, drgającego i obrotowego drobina zostanie tak gwałtownie wyrzucona przez drobiny sąsiednie, że, zanim utraci nabytą prędkość wskutek sił powstrzymujących, wyjdzie już poza sferę ich działania i poleci dalej w przestrzeń ponad cieczą.

Przypuśćmy, że przestrzeń ta jest zamknięta i pierwotnie pusta; będzie ona stopniowo zapełniała się wyrzuconemi drobinami. Zachowują się one jak gaz i w ruchu swym uderzają o ścianki. Lecz jedną ze ścianek stanowi powierzchnia cieczy; gdy drobina uderzy o nią, naogół nie odrzuci jej ona, lecz zatrzyma ją i wchłonie, dzięki przyciąganiu przez własne drobiny. Stan równowagi nastąpi wtedy, gdy w przestrzeni górnej zbierze się tyle drobin, iż liczba ich, jaka będzie w ciągu jednostki czasu uderzała o powierzchnię cieczy i zo-

---

[1]) Ob. rozd. II, prawo Maxwell'a.

stanie przez nią zatrzymana, będzie przeciętnie równa liczbie drobin, wyrzucanych przez tę powierzchnię. Stan równowagi nie jest tu więc stanem spoczynku, w którym parowanie ustało, lecz takim stanem, w którym parowanie i skraplanie są równie silne i kompensują się nawzajem [1]).

Gęstość pary, potrzebnej do tego skompensowania, zależy od tego, ile drobin powierzchnia cieczy wysyła w ciągu jednostki czasu, a ta liczba jest oczywiście zależna od żywości ruchów wewnątrz cieczy, to znaczy od jej temperatury. Dotychczas nie powiodło mi się wyprowadzić z tych rozważań prawa, według jakiego gęstość pary powinna wzrastać z temperaturą...

18. Możemy zużytkować znalezione równania do wyciągnięcia interesujących wniosków, a mianowicie do wyznaczenia prędkości c, z jaką poruszają się drobiny gazu.

Clausius przeprowadza obliczenie w praktycznym układzie jednostek; dla ułatwienia dzisiejszemu czytelnikowi zrozumienia rachunku, podajemy go tu przerobiony na układ c. g. s.

Z równania (poprawionego) Kröniga-Clausiusa wynika: $c^2 = \frac{3\,p.\,v.}{n.\,m.}$; $nm = M$ jest masą całej ilości gazu. Przypuśćmy, że bierzemy $M = 1$ gr.; $p = 1$ atm. $= 10333 \frac{Gr.}{cm^2.} = 10333 \,.\, 981 \frac{dyn.}{cm^2.}$ Jeśli gaz jest powietrzem, to wiadomo, że objętość właściwa powietrza pod ciśnieniem 1 atm. i w temperaturze bezwzględnej $T = 273^0$ $(t = 0)$ wynosi $773.3 \frac{cm.^3}{gr.}$. Dla gazu o gęstości ρ, mierzonej względem powietrza, objętość właściwa wyniesie $\frac{773.3}{\rho} \cdot \frac{cm^3.}{gr.}$.

Gdy podstawimy to w równanie dla c^2 otrzymamy:

$$c^2 = 3.\ 10333.\ 981 \cdot \frac{773{,}3}{\rho} \cdot \frac{cm^2.}{sek^2.}\ .$$

$$= 2351 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{\rho}\ \frac{cm^2.}{sek^2.}$$

stąd:

$$c = 48500 \frac{cm.}{sek.} \sqrt{\frac{1}{\rho}} = 485 \frac{m.}{sek.} \sqrt{\frac{1}{\rho}}$$

Stąd obliczamy następujące liczby dla gazów w temperaturze topnienia lodu:

---

[1]) [Stan taki nazywamy dziś stanem równowagi statystycznej].

dla tlenu . . . 461 m/sek.
dla azotu . . . 492 m/sek.
dla wodoru . . 1844 m/sek.

Te liczby są prędkościami przeciętnemi, które dałyby dla wszystkich drobin taką samą siłę żywą, jak ich prędkości rzeczywiste. Jest jednak możliwe, że prędkości prawdziwe poszczególnych drobin znacznie się odchylają od tych wartości średnich [1])...

---

[1]) [Por. bezpośredni pomiar prędkości drobin na końcu tego działu].

Rozdział II.

DALSZY ROZWÓJ TEORJI.

TEORJĘ, naszkicowaną w pracach Króniga i Clausius'a, należało opracować szczegółowo, wytłumaczyć przy jej pomocy wszystkie właściwości stanu gazowego, wreszcie zdobyć dane liczbowe, dotyczące zasadniczych wielkości molekularnych.

Obliczenia Króniga i Clausius'a były przeprowadzone w przypuszczeniu, że wszystkie drobiny mają te same prędkości. To mogło wystarczyć tylko jako założenie tymczasowe, które musiało następnie zostać usunięte. Łatwo zrozumieć, że, gdyby nawet w pewnej chwili wszystkie drobiny istotnie miały takie same prędkości, to wzajemne zderzenia zniszczyłyby niebawem tak mało prawdopodobny stan, gdyż tylko w rzadkich wypadkach zderzenie dwóch drobin odbyłoby się bez zmiany pierwotnych prędkości. Każda drobina, potrącona przez inne drobiny, ustawicznie zmienia swą prędkość, i w jednej i tej samej chwili różne drobiny mają różne prędkości. Jednak, jeśli drobin gazu jest bardzo dużo, i gaz jest dostatecznie długo pozostawiony sobie, to w końcu musi się wytworzyć pewien stan stateczny: różne wartości prędkości muszą się rozłożyć w pewien określony sposób na drobiny. Ściślej wyrazimy to w sposób następujący: podzielmy wszystkie występujące wartości prędkości na przedziały, tak aby w każdym z nich różnica pomiędzy najniższą a najwyższą wartością była jednakowa; podzielmy drobiny na grupy, tak by każda obejmowała drobiny, których prędkości należą w określonej, rozpatrywanej chwili do danego przedziału. Stan ustalony będzie zachodził wtedy, gdy grupy te będą liczebnie niezmienne, t. j. gdy na miejsce drobin, wychodzących z danej grupy wskutek zmiany prędkości, wejdą do niej równie licznie nowe drobiny, które przedtem miały inne prędkości.

Losy każdej poszczególnej molekuły możemy uważać za przypadkowe, w tem znaczeniu, że, wobec mnóstwa możliwych zderzeń z mo-

lekułami sąsiedniemi, nie możemy przewidzieć, ani obliczyć, które z nich zajdą i w jaki sposób. Jeśli jednak weźmiemy cały zespół drobin, — a jak zobaczymy niebawem, centymetr sześcienny powietrza zawiera ich miljony miljardów — to tak jak wszędzie, gdzie chodzi o wielkie mnóstwo zdarzeń, możemy stosować reguły rachunku prawdopodobieństwa.

Tę zupełnie nową metodę badania zjawisk fizycznych zastosował w r. 1860 Maxwell (ob. tom II, dział Eleketryczność i Magnetyzm) do poruszanego tu zagadnienia rozkładu prędkości i doszedł tą drogą do słynnego wzoru matematycznego, nazwanego „prawem Maxwella". Prawo to mówi, że dla każdej temperatury istnieje pewna wartość najbardziej prawdopodobna prędkości; w każdym momencie najwięcej drobin jest nią obdarzonych. Prędkość najprawdopodobniejsza różni się tylko czynnikiem liczbowym od wartości średniej. Inne prędkości — większe i mniejsze — występują rzadziej, i to tem rzadziej, im bardziej różnią się od wartości prawdopodobnej. Zależność wyraża się t. zw. krzywą błędów, wprowadzoną przez matematyka Gauss'a dla wyrażenia częstości występowania różnych wartości błędów przypadkowych, jakie popełniamy przy pomiarach i obserwacjach (ob. rozprawę Boltzmanna).

Metody, jakie wprowadziła teorja kinetyczna gazów, a w szczególności prace Clausius'a i Maxwell'a, mają wielkie znaczenie dla rozwoju nowoczesnej fizyki teoretycznej. Fizyka dotychczasowa, rozpatrując zjawiska, zachodzące w wielkich stosunkowo masach, badając zjawiska makroskopowo, opierała się na prawach ścisłych, stanowczych i nieugiętych. W swych poglądach wypełniała przestrzeń, zajętą przez ciało fizyczne, jednolitą, ciągłą materją, której właściwości i cechy nie zależą od wielkości rozpatrywanego elementu. Np. gęstość ciała była uważana za jednostajną, niezmienną i niezależną od tego, czy obliczamy ją dla objętości dużych, czy małych, chociażby nieskończenie małych. Tak samo ciśnienie, wywierane na ściankę naczynia, ma tę samą wartość, czy rozpatrujemy całą ściankę, czy jej część, czy niezmiernie mały jej element.

Kinetyczna teorja materji zajmuje stanowisko zupełnie różne od tego: dla niej cechy ciał makroskopowe, to jest te, które podlegają naszej obserwacji i pomiarom, są wypadkową działania niezmiernie wielkiej liczby ruchliwych indywidualnych drobin, których ruch zmienia się ustawicznie i to w sposób przypadkowy. To, co obserwujemy, jest pewną średnią, przeciętną, tem dokładniej wy-

równaną, im większa jest rozpatrywana masa ciała, im więcej indywiduów jest w rozpatrywanym tłumie. W pewnym elemencie objętości gazu napotykamy coraz to inne drobiny, jedne z nich wpadają, drugie uchodzą z tego elementu, ale przeciętnie tyle samo przybywa, ile ubywa i masa elementu, a więc i jego gęstość średnia nie ulega zmianie. Element powierzchni ścianki naczynia jest bombardowany przez coraz to inne drobiny o coraz to innych prędkościach, ale przeciętna ilość pędu, udzielana ściance w ciągu jednostki czasu, jest wciąż taka sama: ciśnienie jest ciągłe i stałe.

W ten sposób prawa materji ciągłej zostały zastąpione przez rozważania statystyczne. Wedle słów Marjana Smoluchowskiego: „Statystyczna metoda rozumowania i złączony z nią rachunek prawdopodobieństwa wysuwają się na czoło fizyki, jako właściwe metody badania teoretycznego, a termodynamika i wszystkie dotychczasowe prawa fizyki, — o ile odnoszą się do ciał materjalnych — schodzą do rzędu przybliżenie ważnych reguł przeciętnego przebiegu zjawisk"[1]).

Wielkości, charakteryzujące ruch drobinowy, są to więc wielkości średnie, przeciętne. Jedną z najważniejszych zpośród nich jest wprowadzona do teorji przez Clausius'a średnia droga swobodna molekuł. Drobina, uderzana ustawicznie przez inne drobiny, tylko przez niezmiernie krótki czas może poruszać się swobodnie, w linji prostej. Tor jej ulega bezustannym załamaniom i przybiera postać linji zygzakowatej. Droga pomiędzy jednem a drugiem zderzeniem jest raz krótsza, raz dłuższa, zależnie od przypadku; ale można obliczyć jej wartość średnią dla danych warunków. Zakładając, że drobiny są kulami o promieniu ϱ i że posiadają wszystkie jednakowe prędkości, Clausius wyprowadził bardzo prosty wzór na średnią drogę swobodną drobiny

$$\bar{l} = \frac{3}{4 n \pi \varrho^2}$$

n jest tu liczbą drobin w jednostce objętości, $\pi\varrho^2$ przedstawia pole przekroju każdej drobiny.

Maxwell, opierając się na podanem przez siebie prawie rozkładu, skorygował nieznacznie czynnik liczbowy tego wzoru (zamiast $\frac{3}{4} = 0{,}75$ otrzymał $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}702$).

[1]) „O fluktuacjach termodynamicznych", str. 192.

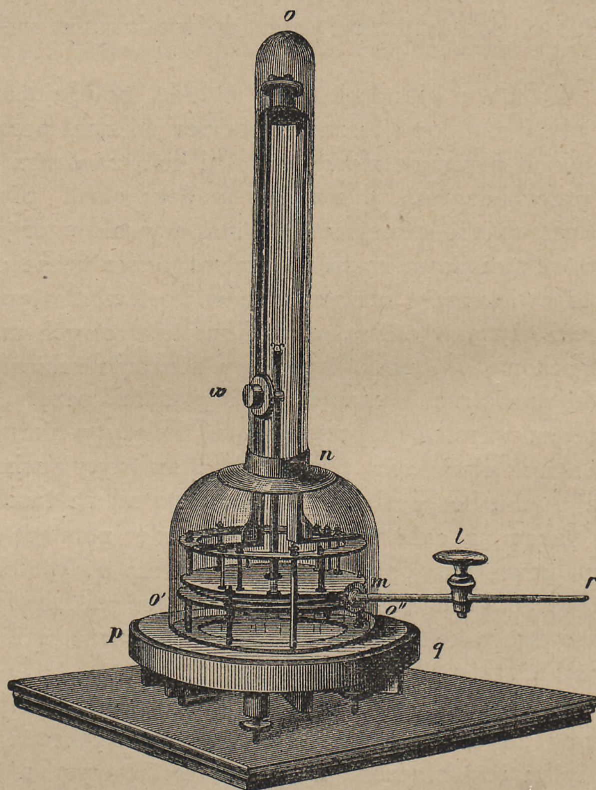
M a x w e l l spożytkował pojęcie średniej drogi swobodnej przy badaniu teoretycznem zjawisk, zachodzących w gazach, a w szczególności w teorji tarcia wewnętrznego. Teorja ta, w której szczegóły wchodzić tu nie możemy, odegrała ważną rolę w dziejach rozwoju kinetycznej teorji gazów. Doprowadziła ona M a x w e l l a do zdumiewającego wniosku, że tarcie wewnętrzne w gazach jest niezależne od ciśnienia. Mimo całą paradoksalność tego wniosku, został on w zupełności potwierdzony przez doświadczenia wielu eksperymentatorów.

Już sam M a x w e l l udoskonalił metodę, polegającą na tłumieniu ruchów płyty metalowej, i za jej pomocą dokonał pomiarów. Przy pomiarach takich płytę metalową kształtu koła zawiesza się poziomo na drucie, przechodzącym przez jej środek; obrót płyty naokoło drutu, jako osi, dzięki sprężystości drutu, wywołuje drgania obrotowe płyty, które stopniowo zostają tłumione przez tarcie o powietrze; aby tarcie to zwiększyć i otrzymać je w postaci, dostępnej obliczeniu, pod i nad płytą, w odstępach kilkomilimetrowych umieszcza się 2 płyty nieruchome. W teorji tego doświadczenia robi się założenie, że warstewki powietrza, stykające się z płytami, przylegają do nich ściśle, że zatem warstewka przylegająca do płyty nieruchomej jest sama nieruchoma, a warstwa, przylegająca do płyty ruchomej, bierze udział w jej ruchu bez poślizgu. Wobec tego niema tarcia pomiędzy metalem a gazem, a całe tarcie odbywa się pomiędzy kolejnemi warstewkami powietrza; opór zależy więc tylko od spółczynnika tarcia wewnętrznego gazu, czyli od spółczynnika jego lepkości, i daje się względnie łatwo obliczyć z rozmiarów przyrządu i z szybkości tłumienia ruchu płyty.

K u n d t i W a r b u r g (1895) przystosowali ten przyrząd do pomiarów pod zmiennem ciśnieniem; rys. 68 wyobraża ich aparat. Ruchoma płytka jest złączona z prętem metalowym, a ten jest zawieszony „bifilarnie", t. j. na dwóch niciach; ten sposób zawieszenia zapewnia lepiej obrót płyty we własnej płaszczyźnie, bez szkodliwych wahań pionowych. Zwierciadło, zawieszone na pręcie, pozwala obserwować drgania układu. Cały przyrząd umieszczono pod kloszem, zpod którego można było wypompowywać powietrze. K. i W. skonstatowali, że założenia teorji eksperymentu zawodzą dla ciśnień poniżej 20 mm. Hg., gdyż od tej granicy daje się odczuwać wpływ poślizgu gazu względem płyty. Po uwzględnieniu tego czynnika mogli stwierdzić niezależność spółczynnika tarcia od ciśnienia aż do 0,6 mm. Hg.

Teorja M a x w e l l a ustaliła zależność spółczynnika tarcia gazów od średniej drogi swobodnej drobin. Wyznaczenie doświadczalne tego spółczynnika pozwoliło więc obliczyć drogę swobodną. Dla tlenu w warunkach normalnych znaleziono 9,5 . 10^{-6} cm.

Teorja M a x w e l l a przestaje być słuszna, gdy gaz dochodzi do tak wielkich rozrzedzeń, że drogi swobodne drobin stają się niewiele



Rys. 68.
Przyrząd Kundta i Warburga do pomiaru tarcia wewnętrznego gazów.

co mniejsze lub nawet większe od rozmiarów naczynia, w którem gaz jest zawarty. Średnia droga swobodna drobin powietrza pod ciśnieniem normalnem, obliczona z wartości spółczynnika tarcia wewnętrznego, wynosi około 10^{-5} cm., wyniosłaby więc 10 cm. pod ciśnieniem miljon razy większem, czyli nieco mniejszem od 0,001 mm. Hg. W tych warunkach gazy silnie rozrzedzone (gaz ultra - raréfiés)

rządzą się innemi prawami, niż gazy zwykłe. Zasłużony szwedzki badacz tej dziedziny, Knudsen, opracował teoretycznie i doświadczalnie (1909) tarcie wewnętrzne takich gazów, prowadząc pomiary aż do ciśnienia 0,00001 mm. Hg. Smoluchowski w 1898 (ob. niżej) stworzył teorję przewodnictwa cieplnego gazów silnie rozrzedzonych, w której stwierdził możliwość istnienia skoku temperatury pomiędzy gazem a ściankami naczynia. Zgodność wyników doświadczalnych z teorją gazów silnie rozrzedzonych, opartą na rozważaniach ruchu drobin, stanowi silny argument na korzyść przyjętych w teorji założeń, a więc przedewszystkiem na korzyść teorji drobinowej budowy materji i kinetycznej teorji gazów.

Jeżeli weźmiemy pod uwagę, że drobiny poruszają się, według obliczenia Clausiusa (ob. str. 361), z ogromną prędkością około pół kilometra na sekundę, to zrozumiemy, jak częste muszą być zderzenia, redukujące drogę swobodną do tak znikomych rozmiarów. Dzieląc prędkość średnią drobiny tlenu, t. j. 460 m./sek. przez średnią drogę swobodną, otrzymujemy 4700 miljonów zderzeń każdej drobiny w ciągu jednej sekundy!

Te liczby są najlepszą odpowiedzią na zarzut, jaki stawiano kinetycznej teorji gazów, a mianowicie, że prędkości drobin stoją w sprzeczności z prędkością rozchodzenia się jednego gazu w drugim (dyfuzja). Istotnie, nie można porównywać drogi, jakąby drobina przebyła ruchem nieprzerwanym, z zygzakowatym, zagmatwanym torem, jaki zakreśla pod wpływem zderzeń. Prawo oddalania się od punktu wyjścia jest zupełnie inne, i nie może tu być mowy o „prędkości" przenikania w zwykłem znaczeniu tego wyrazu (ob. Smoluchowski „o fluktuacjach termodynamicznych", § 18).

Znając średnią drogę swobodną drobin, możemy już obliczać inne wielkości fizyki drobinowej. Odwrotność $\bar{l}$ równa się $n\pi\varrho^2$ czyli sumie przekrojów wszystkich drobin, zawartych w jednostce objętości. Gdybyśmy znali sumę objętości tych drobin, $\frac{3}{4}\ n\pi\varrho^3$, to moglibyśmy obliczyć promień drobiny ϱ. W równaniu dla $\bar{l}$ mielibyśmy już znane wszystkie czynniki oprócz n i moglibyśmy obliczyć tę, nadzwyczaj ważną dla fizyki drobinowej wielkość, t. j. liczbę drobin, zawartych w jednostce objętości gazu w warunkach normalnych.

Pierwszy dokonał tego obliczenia austrjak Loschmidt w r. 1865. Jako objętość drobin przyjął tę objętość, którą zajmuje gaz po skropleniu, zakładając, że wtedy drobiny leżą ściśle obok siebie (należy tu uwzględnić kulisty kształt hipotetycznych drobin).

Rzecz prosta, że to dość dowolne założenie nie może dostarczyć

nam dokładnej liczby, lecz zorjentuje nas w rzędzie jej wielkości. Loschmidt przeprowadził rachunek dla dwutlenku węgla i otrzymał:

$$\varrho = 5{,}3.\ 10^{-8}\ \text{cm.} \qquad n = 14{,}10^{18}$$

Zamiast tej, t. zw. liczby Loschmidta n używa się obecnie liczby Avogadry N, t. j. liczby drobin, zawartych w drobinie gramowej (molu). Drobina gramowa jakiegokolwiek gazu zajmuje, zgodnie z prawem Avogadry, zawsze jedną i tę samą objętość (przy tej samej prężności i w tej samej temperaturze). Ta objętość wynosi dla warunków normalnych (t=o, p=76 cm. Hg.) 22,4 litra, czyli 22400 cm.^{3} Otrzymamy więc

$$N = 22400 \,.\, n = 31 \,.\, 10^{22}.$$

Inną drogę obliczenia objętości drobin daje prawo van der Waals'a (ob. niżej), w którem objętość ta wchodzi do równania dla izotermy i łatwo może być obliczona z odchyleń danego gazu od prawa Boyle'a - Mariotte'a. Tą drogą otrzymano poprawniejsze wartości liczby N; np. dla azotu $N = 40.10^{22}$, dla tlenu 50.10^{22}, dla tlenku węgla 45.10^{22}. To obliczenie jest niewątpliwie bardziej przekonywające dla argonu, ponieważ drobina tego jednoatomowego gazu składa się z jednego tylko atomu i z większą słusznością może być przyrównana do kuli, niż drobiny złożone z 2, 3 lub większej liczby atomów. Dla argonu znaleziono

$$\varrho = 1{,}42 \,.\, 10^{-8} \qquad N = 62 \,.\, 10^{22}.$$

Z innemi, nowszemi i dokładniejszemi metodami obliczania stałej Avogadry poznamy się w rozdz. IV. Najlepsze pomiary, oparte na metodach elektrycznych (ob. Perrin) dają wartość $N = 60{,}6 \,.\, 10^{22}$ (Millikan). Przyjmując tę liczbę jako daną, możemy z równania na średnią drogę swobodną (ob. str. 364) obliczyć promień ϱ lub średnicę 2ϱ drobin różnych gazów.

W jakim stopniu różne metody obliczania średnic drobin są z sobą w zgodzie, mówi następująca tabelka, podająca wartości tych średnic (2ϱ) obliczone: a) z tarcia wewnętrznego gazu, b) z objętości drobin, występującej w prawie van der Waals'a, c) z objętości gazu skroplonego; te ostatnie wartości są oczywiście zbyt duże, gdyż przy obliczaniu ich zakłada się, że drobiny w stanie ciekłym stykają się z sobą bezpośrednio, co nie może odpowiadać rzeczywistości. Dane liczbowe są wzięte z t. XXII „Handbuch der Physik"; wartości są podane w 10^{-8} cm.

Średnice drobin.

Gaz	Wzór	Liczba atomów w drobinie	Z tarcia wew.	Z równania v. d. Waalsa	Z objętości g skropl.
Hel	*He*	1	1,88	2,7	4,0
Argon	*Ar*	1	2,97	2,8	4.04
Wodór	H_2	2	2,39	2,81	3,94
Tlen	O_2	2	2,96	3,00	3,88
Azot	N_2	2	3,13	3,18	4,23
Tlenek węgla . .	*CO*	2	3,22	3,22	4,25
Dwutlenek węgla .	CO_2	3	3,39	3,29	4,60
Metan	CH_4	5	3,21	3,23	—

Uproszczenia, jakie poczyniła pierwotna kinetyczna teorja gazów, musiały stopniowo ustępować założeniom ogólniejszym, któreby pozwoliły lepiej przystosować teorję do przebiegu rzeczywistych zjawisk. Już Clausius wymieniał je wyraźnie: zaniedbanie objętości, jaką zajmują same drobiny wobec objętości, zajmowanej przez gaz, — i pominięcie sił, wywieranych wzajemnie na siebie przez drobiny. Te braki teorji usunął holender van der Waals.

JAN DEDERIK VAN DER WAALS.

(1837 — 1923).

Profesor fizyki w Amsterdamie, autor licznych prac z dziedziny termodynamiki, pracował głównie nad kinetyczną teorją materji; w r. 1873 wydał dwutomowe dzieło „O ciągłości stanu gazowego i ciekłego“. W niem wyprowadził nowe równanie dla izotermy gazów rzeczywistych, uwzględniwszy objętość molekuł i ich wzajemne oddziaływanie. Wzór otrzymany nie oddaje jeszcze zachowania się gazów rzeczywistych zupełnie dokładnie, i późniejsi badacze własności gazów musieli go zastąpić innemi, wyprowadzonemi empirycznie z wyników pomiarów. Wzór v. d. Waals'a z tego jednak względu zasługuje na szczególną uwagę, że 1^0 jest oparty na przesłankach teoretycznych i jest przez to wynikiem poglądów na drobinową naturę zjawisk w ciałach materjalnych; 2^0 doprowadził autora do niezmiernie ciekawego i nieoczekiwanego wniosku: zdaje on

sprawę z zachowania się materji nietylko w stanie gazowym, ale i po skropleniu, jako cieczy. Pomiędzy stanem ciekłym a lotnym niema zasadniczej różnicy, i ciało może być przeprowadzone ze stanu niewątpliwie ciekłego w stan niewątpliwej pary w sposób ciągły, nie ulegając ani na chwilę podziałowi na dwie współistniejące fazy, jak to ma miejsce przy zwykłym procesie parowania.

Van der Waals wprowadził też ważne i pożyteczne pojęcie „stanów odpowiednich" (ob. Witkowski, t. II, s. 54).

Wyjątki z dzieła O ciągłości stanu gazowego i ciekłego [1].

Ponieważ drobiny gazu nie są punktami materjalnemi, lecz posiadają pewną własną objętość, przeto przestrzeń, jaką drobiny rozporządzają przy swym ruchu, jest mniejsza, niż objętość gazu. Dokładne zbadanie warunków ruchu prowadzi do wniosku, że drobiny poruszają się tak, jakgdyby objętość naczynia była zmniejszona o poczwórną objętość, jaką zajmują same drobiny; jeśli tę objętość oznaczymy przez b', oraz przyjmiemy $b = 4b'$, to zamiast objętości v we wzorze Króniga-Clausiusa powinno figurować $v—b$. Jeśli ten wzór (str. 356, uwaga) napiszemy w postaci $pv = \frac{1}{3} nmc^2$, przez $M = nm$ oznaczając masę całego gazu, to otrzymamy teraz postać $p(v—b) = \frac{1}{3} Mc^2$.

Tak poprawiony wzór byłby słuszny, gdyby drobiny zachowywały się względem siebie obojętnie podczas ruchu (pomijając chwile zderzeń). Jednak musimy przypuścić, że drobiny wywierają na siebie siły przyciągania; w masie gazu, gdzie każda rozpatrywana drobina jest otoczona ze wszystkich stron innemi drobinami, siły te nawzajem się znoszą, lecz na krańcach masy gazowej, w pobliżu ścianek, drobina będzie przyciągana ku środkowi masy gazowej, jej uderzenia o ścianki będą słabsze i ciśnienie na ścianki będzie mniejsze, niż wypadałoby ze średniej prędkości drobin. Chcąc wyprowadzić ciśnienie gazu z siły żywej [energji kinetycznej] molekuł, musimy do ciśnienia zewnętrznego, t. j. tego, które mierzymy naszymi przyrządami, dodać wyraz, zależny od przyciągania wzajemnego drobin. Wyraz ten zależy od gęstości gazu.

Pomyślmy nieskończenie mały słupek w warstwie powierzchniowej i rozpatrzmy tak wielki obszar ciała pod tą warstwą, aby nie wykluczał ani jednej drobiny, która mogłaby wywierać przyciąganie na ów słupek. Gdyby w tym obszarze znajdowała się jedna drobina... i gdyby była w ruchu, mogłaby zająć którekolwiek miejsce obszaru; możemy powiedzieć, że przyciąganie, wywierane przez tę drobinę jest wartością średnią z tych wszystkich przyciągań, jakie mogłaby wywierać we wszystkich możliwych położeniach wewnątrz tak określo-

---

[1]) „Over de Continuiteit van der Gas - en Vloeistoftoestand", Leiden, 1873. Tłumaczone z II wyd. niemieckiego z r. 1899.

nego obszaru. To samo rozumowanie możemy powtórzyć dla drugiej drobiny, którąby się znajdowała w tym obszarze razem z pierwszą. Krótko mówiąc, przyciąganie, wywierane przez materję, która w pewnej chwili znajduje się w wymienionym obszarze, jest proporcjonalne do jej ilości: czyli do gęstości. Lecz to samo możemy powiedzieć o liczbie drobin, zawartych w rozpatrywanej części warstwy powierzchniowej; zatem poszukiwane przyciąganie jest proporcjonalne do kwadratu gęstości, czyli odwrotnie proporcjonalne do kwadratu objętości...

Jeżeli p oznacza ciśnienie zewnętrzne, v objętość, b wielokrotność objętości drobinowej [c średnią prędkość drobin], a przyciąganie właściwe, to nasze równanie przekształci się w

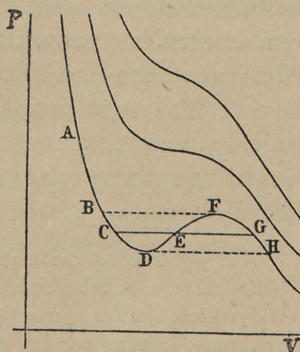
$$\left(p+\frac{a}{v^2}\right)(v-b)=\tfrac{1}{3}Mc^2$$

Mc^2 jest tu proporcjonalne do temperatury.

Autor porównywa wzór z danemi doświadczalnemi, zdobytemi przez Andrews'a dla dwutlenku węgla, przez Janssena dla dwutlenku azotu, i przez siebie dla etylenu. Oblicza b dla różnych ciśnień i temperatur i znajduje, że dla każdego gazu ma ono wartość stałą, choć zdaje się nieco wzrastać z temperaturą.

Temperatura krytyczna.

Mimowoli nasuwa się pytanie, dlaczego poniżej 30,9° niektóre objętości [bezwodnika węglowego] wydają się niemożliwemi, gdy powyżej tej temperatury wszystkie wartości objętości są możliwe? [Ob. badania Andrewsa, str. 208].



Rys. 69.

Rozpatrzmy przebieg krzywej, przedstawionej przez nasze równanie dla stałej t, przyczem v ma być odciętą, a p rzędną. Krzywa ta jest izotermą. Zaniedbując a i b, otrzymujemy równoramienną hiperbolę, którą dotychczas przyjmowano jako izotermę dla t. zw. gazów doskonałych. Widzieliśmy jednak, że dla dwutlenku węgla, a nawet dla powietrza i wodoru nie można uważać stałych za równe zeru. Prawdziwy przebieg krzywej posiada ciekawą cechę, dzięki temu, że dla danego p izoterma daje równanie 3 stopnia względem v.

Takie równanie ma, jak wiadomo, albo jeden albo 3 pierwiastki; więc równoległe względem osi objętości przecinają izotermę w jednym albo w trzech punktach. Inaczej mówiąc: przy danem ciśnieniu i temperaturze możliwe są albo trzy objętości, albo jedna. To, że przy danej temperaturze są możliwe trzy objętości, może wywołać zdziwienie. W niektórych temperaturach znamy ciała w objętości cieczy i w objętości gazu. Czemu odpowiada trzecia objętość?... Aby wyjaśnić sobie zachodzące warunki, wystarczy nakreślić podobną izotermę, np. dla 13,1° (rys. 69).

Dla pewnego ciśnienia, wyobrażonego przez prostą *CEG*, mamy 3 możliwe objętości, dane przez odległości punktów *C*, *E* i *G* od osi ciśnień. Punkt *G* odpowiada objętości pary nasyconej w tej temperaturze, punkt *C* — objętości cieczy pod tem samem ciśnieniem; trzeci punkt *E* leży na tej gałęzi izotermy, na której malejącym ciśnieniom odpowiadają malejące objętości; gdyby taki stan został urzeczywistniony, i nastąpiło choćby najmniejsze zmniejszenie objętości, to powstałby nowy stan, dla którego ciśnienie panujące byłoby zbyt wielkie; to wywołałoby nowe zmniejszenie objętości i ruch ten odbywałby się w sposób przyspieszony. Równowaga w punkcie *E* jest więc chwiejna.

Jest zadziwiające, że objętość ciekła jest jeszcze możliwa przy ciśnieniach niższych, niż ciśnienie pary nasyconej. W świetle doświadczeń Donny'ego i innych staje się to bardziej zrozumiałe.

Ciecze, pozbawione powietrza i umieszczone w opróżnionem naczyniu, którego jeden koniec jest stale utrzymywany w niskiej temperaturze, mogą być ogrzewane bardzo wysoko bez wrzenia [ciecze przegrzane]. Mamy wtedy ciecze pod ciśnieniem niższem niż to, które odpowiada maksymalnemu ciśnieniu pary w tej temperaturze. Punkt *D*... wskazuje więc największą objętość, jaką ciecz może zająć w danej temperaturze. Ciśnienie, odpowiadające punktowi *D* jest najniższem ciśnieniem, przy którem ciecz może jeszcze pozostać cieczą...

Jeszcze jedna część izotermy pozostaje do wytłumaczenia, mianowicie część, leżąca pomiędzy *G* i *F*. Musimy tu postawić pytanie: czy ciśnienie, wywierane przez parę może być większe od tego, które zwykle nazywamy ciśnieniem maksymalnem [ciśnieniem pary nasyconej?].

[Na pytanie to możemy dzisiaj odpowiedzieć twierdząco. Jeśli sucha para jest ochładzana lub ściskana po usunięciu z niej wszelkich pyłków, a przedewszystkiem jonów gazowych, które działają jako jądra skraplania, pozostaje ona parą jeszcze wtedy, gdy ciśnienie wzrosło ponad ciśnienie nasycenia, lub temperatura spadła poniżej tej, w której para w zetknięciu z cieczą jużby się skraplała. Para jest przesycona, a własności jej odpowiadają części *GF* izotermy v. d. Waalsa.

Odcinki *CD* i *GF* można więc urzeczywistnić w szczególnych warunkach, odcinek *FD* jest zupełnie nie do urzeczywistnienia. W warunkach normalnych, bez ostrożności, koniecznych dla przegrzania cieczy lub przesycenia pary, ciało nie będzie szło w swych zmianach za częściami *CD* i *GF*, lecz pójdzie wzdłuż prostej *GEC*, zachowując stałe ciśnienie (pary nasyconej) przy zmiennej objętości, zależnej od tego, jaka część ciała znajduje się w stanie ciekłym, a jaka w gazowym].

Zbadajmy jeszcze, jaki wpływ na przebieg izotermy wywiera wzrost wartości *t*.

Granice, przy których występują objętości niemożliwe, są dla punktów *D* i *E* izotermy 13,1°

$$v_1 = 0{,}0085 \qquad v_2 = 0{,}0056$$

dla izotermy 21,45°

$$v_1 = 0{,}008 \qquad v_2 = 0{,}006$$

Przy wyższych izotermach te pierwiastki zbliżają się do siebie, przy 31° stają się urojone. Przy tej izotermie niema więc już wygięcia *FEDCB*. Zatem linja, równoległa do osi *X*-ów nigdy nie może jej przeciąć w trzech punktach...

Znaczenie tej temperatury, którą A n d r e w s nazwał krytyczną jest jasne na podstawie tego, co było powiedziane. Poniżej jej ciało może istnieć zarówno w tak zwanym stanie cieczy, jak i w tak zwanym stanie pary, w zależności od panującego ciśnienia; przy pewnych ciśnieniach—w obu stanach [jednocześnie]; lecz powyżej—tylko w jednym stanie, zupełnie niezależnie od ciśnienia. W tym stanie bezcelowemi byłyby wszelkie próby skroplenia...

Powyżej temperatury krytycznej ciało słusznie zasługuje na nazwę gazu trwałego. Tak nazwano, z większą dozą słuszności, niż się często przypuszcza, te gazy, których nie zdołano dotychczas skroplić. Ale nie można do nich zaliczać tylko pięciu gazów znanych. Powyżej 30,9° dwutlenek węgla zalicza się do tej samej grupy...

Nakoniec pozostaje otwarte pytanie: kiedy można mówić o stanie cieczy, a kiedy o stanie pary? Po tem, co zostało powiedziane, nikt nie będzie przypuszczał, że przejście pomiędzy temi stanami odbywa się nagłym skokiem. Przeciwnie, widzieliśmy, że są one objęte jednem i tem samem równaniem.

Nie chodzi tu ani o gęstość ,ani o ciśnienie. Rodzaj ruchu może być taki sam w obu stanach, jak niemniej wartość siły molekularnej. Jest więc możliwe przeprowadzenie pewnej ilości pary w ciecz w spo-

sób najzupełniej ciągły. Jeśli mamy pewną objętość dwutlenku węgla w 13,1° pod ciśnieniem niższem od ciśnienia pary nasyconej, i jeśli będziemy w tej temperaturze zmniejszali objętość, to następuje przejście nagłe, i w zupełnie określonej objętości cała masa będzie ciekła. Jeśli natomiast ogrzejemy ciało w stałej objętości powyżej temperatury krytycznej, przyczem pozostaje ono oczywiście gazem, i zmniejszymy jego objętość do tej wartości, która odpowiada drugiemu stanowi [cieczy skroplonej], to będzie ono wciąż gazem, ponieważ powyżej temperatury krytycznej ciało nie może stać się cieczą. Teraz ochładzajmy ciało, utrzymując ostatnio osiągniętą wartość objętości. I tu nie nastąpi nigdzie przemiana, ponieważ ciało wypełnia jednolicie całą przestrzeń. Nie możemy nie nazwać gazem tego, cośmy poprzednio nazywali cieczą. Tę ostatnią uwagę zapożyczyłem od Maxwella...

Rozdział III.

DRUGA ZASADA TERMODYNAMIKI.

PUNKTEM wyjścia dla kinetycznej teorji gazów była zasada równoważności ciepła i pracy, czyli I zasada termodynamiki; energja cieplna została w niej utożsamiona z mechaniczną energją ruchów drobinowych. Istniejąca obok I zasady II zasada termodynamiki stanowiła przez długi czas poważny szkopuł dla teorji. Stwierdzała ona, że zjawiska cieplne podążają w jednym kierunku, określonym przez zasadę wzrostu entropji, i nie mogą przebiegać wstecz; innemi słowy, są nieodwracalne. Tymczasem zjawiska mechaniczne, zachodzące pomiędzy ciałami doskonale sprężystemi, są zasadniczo odwracalne: każde z nich może przebiegać tak w danym porządku, jak i w porządku odwróconym. Pogodzenie tych dwóch stanowisk: termodynamicznego i mechanicznego wymagało nowej, twórczej hipotezy. Dał ją w r. 1878 znakomity profesor uniwersytetu wiedeńskiego Ludwik Boltzmann, opierając się na matematycznie ujętem pojęciu prawdopodobieństwa rozkładu energji na układ drobin. Dowiódł on, że zasada wzrostu entropji jest niczem innem, jak zasadą dążenia układu drobin od stanów mniej prawdopodobnych do stanu najprawdopodobniejszego; prawdopodobieństwo rozkładu jest związane z entropją bardzo prostym wzorem matematycznym. Poniżej czytelnik znajdzie poglądy Boltzmanna, ujęte przez niego w formę bardziej przystępną.

LUDWIK BOLTZMANN.

(1844 — 1906).

Był profesorem kolejno w Graz, Wiedniu, Monachjum i Lipsku. Pierwsze większe prace poświęcił badaniom nad stałą dielektryczną gazów, by na tej drodze stwierdzić przepowiedzianą przez Maxwella zależność pomiędzy tą stałą ośrodka, a jego spółczynnikiem

załamania dla promieni świetlnych (ob. dział Elektryczność i Magnetyzm, s. 145). Później zwrócił się do termodynamiki i kinetycznej teorji gazów, którą wzbogacił nietylko faktycznemi zdobyczami — w pierwszym rzędzie wytłumaczeniem II zasady z punktu widzenia tej teorji — ale i nowemi metodami traktowania zagadnień fizyki drobinowej. W latach 1896—7 rozwinęła się ożywiona polemika, wywołana atakami Ostwalda, Helma i innych na metody atomistyczne w fizyce i chemji. Uważając atomizm za hipotezę, nie opartą na żadnych konkretnych dowodach, uznano go za zbyteczny, a nawet szkodliwy, i przeciwstawiono mu „energietykę", która ma badać wzajemne przemiany dostępnych pomiarom form energji, nie posługując się przy tem żadnemi teorjami, wykraczającemi poza granice zjawisk dostrzegalnych. Boltzmann wystąpił z energiczną i trafną obroną teoryj atomowych i drobinowych. Niebawem dalszy rozwój fizyki przyznał mu rację. Badania ruchów Browna, rozciągnięcie hipotezy atomowej na zjawiska elektryczne, a nieco później na dziedzinę promieniowania, zapoczątkowały epokę nowego, świetnego rozkwitu atomizmu.

Swoje myśli i badania zebrał Boltzmann w znakomitem dziele „O teorji gazów", wydanem w r. 1895. Prócz tego wydał „Wykłady o teorji elektryczności Maxwella" i „Wykłady o zasadach mechaniki" (1904); w tomie „Pism popularnych" (1905) zebrał mniejsze prace oraz szereg pięknym stylem i z polotem napisanych odczytów i przemówień. Urywki z jednego z nich przytaczamy poniżej.

Druga zasada mechanicznej teorji ciepła [1]).

. . . .

Z teorją atomów ściśle wiąże się hipoteza, według której nie możemy uważać, iż te elementy świata cielesnego spoczywają i, leżąc sztywno obok siebie, składają się na materję, tak jak cegły składają się na mur, lecz że są one opanowane żywym ruchem. I ta hipoteza, której przydano nazwę mechanicznej teorji ciepła, jest poglądem mocno opartym o fakty. Potwierdzenie w liczbie i wielkości zawdzięcza ona zasadzie zachowania energji, po raz pierwszy jasno wypowiedzianej przez Roberta Mayera... Ciepło, widzialna siła żywa i praca [raczej zapas pracy w postaci energji potencjalnej] mogą dowolnie powstawać jedna z drugiej i przetwarzać się jedna w drugą, przyczem ilość ich [łączna] pozostaje niezmieniona.

---

[1]) Odczyt w Wiedeńskiej Akademji Nauk z dn. 29 maja 1886. Tłumaczone z „Populäre Schriften", Lipsk, 1905.

Do tej zasady ogólnej dołączyła mechaniczna teorja ciepła drugą, ograniczającą ją w sposób dostateczny; tę drugą zasadę mechanicznej teorji ciepła formułujemy, jak następuje: praca i widzialna [1]) siła żywa mogą bez ograniczeń przechodzić jedna w drugą i bez ograniczeń zamieniać się na ciepło; odwrotnie, przechodzenie ciepła z powrotem w pracę lub widzialną siłę żywą jest albo zupełnie niemożliwe, albo możliwe tylko częściowo... Z tego powodu cieplna postać energji jest często nazywana energją rozproszoną albo zdegradowaną...

Zamiarem moim jest oświetlić drugą zasadę nieco bliżej z innego stanowiska. Ruchy cieplne drobin najprawdopodobniej nie są tak uporządkowane, by jakaś większa grupa drobin sąsiednich znajdowała się w tym samym stanie ruchu, lecz każda drobina, jeśli pominąć nieustanne wzajemne oddziaływania [zderzenia], porusza się samodzielnie po swoim torze, stanowi niejako samodzielnie występujące indywiduum.

Możnaby mniemać, że ta samodzielność składowych części ciała ujawni się odrazu w zewnętrznych jego własnościach, że np. w poziomym pręcie metalowym to prawy to lewy koniec powinien się nagrzewać, stosownie do tego, czy w tem, czy w innem miejscu drobiny wykonywałyby żywsze drgania; że w gazie, gdyby prędkości bardzo wielu molekuł były skierowane ku jednemu punktowi, tam właśnie powstawałaby nagle większa gęstość. Takich objawów nie spotykamy [por. S m o l u c h o w s k i o fluktuacjach], a winę tego ponosi jedynie tak zwane prawo wielkich liczb.

B u c k l e, jak wiadomo, dowiódł zapomocą statystyki, że jeśli tylko wziąć pod uwagę dostatecznie wielką liczbę ludzi, to wtedy nietylko liczba wypadków, wywołanych przez prawa natury, jak śmierć, choroby i t. d., ale również i względna liczba t. zw. postępków dowolnych, zawierania małżeństw w oznaczonym wieku, zbrodni, samobójstw jest zupełnie stała, — o ile tylko okoliczności zewnętrzne nie zmienią się zasadniczo. Nieinaczej zachowują się molekuły. Ciśnienie gazu na tłok powstaje wskutek tego, że uderza o niego to jedna, to druga, to słabiej, to gwałtowniej, to prosto, to ukośnie; dzięki jednak ogromnej liczbie uderzających drobin, nietylko całkowite ciśnienie jest wciąż takie same, ale i na każdą dowolnie małą, widzialną lub dostrzegalną cząstkę powierzchni tłoka przypada przeciętnie jednakowe natężenie uderzeń. Jeśli zauważymy w jednem

---

[1]) [W odróżnieniu od „niewidzialnej" siły żywej, czyli energji kinetycznej ruchów molekularnych].

miejscu, że ciśnienie jest większe, to zaczynamy natychmiast poszukiwać przyczyny zewnętrznej, sprawiającej zwiększony napływ drobin do tego miejsca. Jeśli w pewnym układzie ciał jest zawarta dana ilość energji, to energja ta nie będzie się przekształcała dowolnie raz w ten, raz w inny sposób, lecz będzie zawsze przechodziła z postaci mniej prawdopodobnych w postaci bardziej prawdopodobne; jeśli jej rozkład pomiędzy poszczególne ciała nie odpowiadał początkowo prawom prawdopodobieństwa, to będzie się on do tego zbliżał stopniowo. Lecz właśnie te postaci energji, które pragniemy zrealizować praktycznie, są zawsze mało prawdopodobne. Chcemy np., aby ciało poruszało się jako całość; do tego potrzeba, aby wszystkie drobiny tego ciała miały prędkości jednakowe i jednakowo skierowane. Jeśli uważamy drobiny za indywidua niezależne, to jest to właśnie najmniej prawdopodobny przypadek, jaki sobie tylko możemy pomyśleć. Wiadomo, jak trudno jest osiągnąć, aby duża liczba samodzielnych osobników wykonywała dokładnie to samo, w dokładnie ten sam sposób. Lecz jedynie przez taką zgodność wszystkich ruchów można osiągnąć najwyższy cel — nieograniczoną przemienność [energji]. Każde uchylenie się od tej zgodności stanowi degradację energji. Równie nieprawdopodobna jest energja w postaci czystej pracy mechanicznej [energji potencjalnej]...

Zatem te postaci energji, które nazwaliśmy zdegradowanemi, będą poprostu postaciami najbardziej prawdopodobnemi, lub lepiej jeszcze będzie to energja, rozłożona pomiędzy drobiny w sposób najprawdopodobniejszy. Wyobraźmy sobie, że do pewnej liczby białych kul dodano również pewną liczbę kul czarnych, pozatem takich samych. Niechaj początkowo w jednem miejscu znajdują się same białe kule, w innem same czarne. Lecz zmieszajmy je ręką, lub poddajmy innym wpływom, zmieniającym nieustannie ich położenie, a po pewnym czasie zobaczymy, że są najzupełniej pomieszane. Podobnie zachowuje się ciało gorętsze od swego otoczenia; mamy tu większą grupę drobin, poruszających się prędzej, w otoczeniu drobin o ruchu powolniejszym. Jeśli zetkniemy ciało gorętsze bezpośrednio z jego zimniejszem otoczeniem, to wytworzy się rozkład prędkości taki, jaki odpowiada prawom prawdopodobieństwa: temperatura się wyrówna. Jeśli jednak użyjemy do tego drogi okólnej, to możemy skorzystać z istniejącego nieprawdopodobieństwa w rozkładzie energji, aby na jej koszt wytworzyć inne nieprawdopodobieństwa, które nie powstałyby same przez się. Korzystając ze sposobności przechodzenia ciepła z ciała cieplejszego do chłodniejszego, możemy część przechodzącego ciepła

przemienić w widzialny ruch lub w pracę; to się dzieje w maszynach parowych i wogóle we wszystkich maszynach cieplnych...

W jednorodnym gazie nie wszystkie drobiny mają te same prędkości; jedne mają znacznie większą, inne znacznie mniejszą od średniej; pierwszy Maxwell dowiódł, że wszystkie te prędkości są rozłożone zupełnie tak samo, jak błędy obserwacji, które się zawsze zakradną, gdy tę samą wielkość mierzymy wielokrotnie w jednych i tych samych warunkach. Zgodność tych dwóch praw nie może być przypadkową: oba są wynikiem tych samych prawideł prawdopodobieństwa...

Jesteśmy w stanie nietylko jakościowo oznaczyć pewien rozkład energji jako prawdopodobny, a inny jako nieprawdopodobny; tak w tym, jak i w innych, związanych z nim wypadkach, rachunek prawodpodobieństwa pozwala nam ustanowić ścisłą miarę prawdopodobieństwa danego rozkładu energji; pod tym, oczywiście, warunkiem, że znane są mechaniczne warunki układu... Każdemu rozkładowi energji odpowiada ilościowo określony stopień prawdopodobieństwa. Ponieważ we wszystkich praktycznie ważnych wypadkach jest on identyczny z wielkością, którą Clausius nazwał entropją, więc będziemy mu tu nadawali tę nazwę [1]). Wszelkie procesy, przy których entropja rośnie, odbywają się, według wyrażenia Clausius'a, same przez się. Natomiast zmniejszenie entropji może nastąpić tylko wtedy, jeśli jednocześnie entropja innego układu wzrasta o tyle samo, albo i o więcej. Jeśli mamy dwa ciała o pierwotnie różnej temperaturze, i jeśli temperatury ich wyrównywają się, to możemy ściśle obliczyć stopień prawdopodobieństwa w stanie pierwotnym, kiedy pomiędzy ciałami istniała różnica temperatur, i stopień prawdopodobieństwa w stanie obecnym, bardziej prawdopodobnym; możemy też ustalić, jaka część przechodzącego ciepła daje się przemienić w pracę. W tych wypadkach jedynie, gdy temperatury bardzo znacznie różnią się od siebie, jak np. różnią się temperatury palącego się węgla lub gazu piorunującego od naszych zwykłych temperatur, możemy przemienić w pracę prawie całe przechodzące ciepło. W matematyce mówimy o tem: przy przejściu od temperatury nieskończenie wielkiej do skończonej, całe ciepło może być przemienione w ciepło; lecz nieskończenie wysoka temperatura jest niejako nieskończenie mało prawdopodobna. Również wypadek, w którym ruchy wszystkich atomów

---

[1]) [W swych pracach naukowych Boltzmann dowiódł, że zmiana logarytmu prawdopodobieństwa danego układu równa się zmianie jego entropji].

są jednakowe i jednakowo skierowane, czyli inaczej wypadek poruszania się całego ciała ruchem widzialnym, odpowiada nieskończenie mało prawdopodobnej konfiguracji energji; inaczej mówiąc, ruch widzialny zachowuje się jak ciepło o nieskończenie wysokiej temperaturze: może być całkowicie przemieniony w pracę .

Maszyny mają na celu przezwyciężanie ciężarów zapomocą siły, jaką rozporządzamy. Obliczamy maszyny zawsze tak, jakgdyby siła dokładnie równoważyła ciężar, choć praktycznie wypadek ten jest bezużyteczny; póki panuje równowaga, ciężar nie może być ani o włos podniesiony — do tego potrzeba, aby siła była choć cokolwiek większa. Zupełnie podobnie dzieje się w nauce o cieple: rozważa się tam takie przemiany energietyczne, przy których prawdopodobieństwo rozkładu energji pozostaje bez zmiany. Te przemiany nazywamy odwracalnemi; ponieważ bowiem prawdopodobieństwo się nie zmienia, przemiana równie dobrze może zachodzić w przeciwnym porządku; coprawda, biorąc ściśle, nie może się ona odbywać ani w jednej, ani w drugiej kolejności; podobnie jak ciężar nie może być poruszony przez siłę w wypadku równowagi, ponieważ przemiana energji zachodzi rzeczywiście tylko wtedy, gdy przez nią stan układu staje się bardziej prawdopodobnym. Jeśli jednak różnicę prawdopodobieństwa pomyślimy jako bardzo małą, to możemy wówczas zbliżyć się dowolnie blisko do odwracalnej zmiany stanu układu. W tem to znaczeniu teoretycy zjawisk cieplnych mówią o przechodzeniu ciepła z jednego ciała do drugiego o tej samej temperaturze, lub o poruszaniu tłoka, gdy ciśnienie i równoważący je ciężar są zupełnie równe; w rzeczywistości drugie ciało będzie zawsze nieco chłodniejsze, ciężar równoważący nieco mniejszy...

Sławi się słońce jako źródło energji nietylko życia roślin i zwierząt oraz zjawisk meteorologicznych, ale wszelkiej wogóle pracy na ziemi. H e l m h o l t z wykazał, że i to ciepło, które otrzymujemy z węgla kamiennego, jest tylko nagromadzonem ciepłem słońca. Nie wiem jednak, czy dostatecznie jasno wskazano na przyczynę, dlaczego t o właśnie źródło energji jest dla nas tak pożyteczne; w ciałach, znajdujących się na powierzchni ziemi i łatwo nam dostępnych, nagromadzone są zapasy energji, o których rozmiarach nie mamy pojęcia. Jeśli ciepło, wywiązywane przez sam tylko wodospad Niagary, wystarczałoby do pędzenia znacznej części wszystkich naszych maszyn, to jakże niewyczerpany zapas energji posiadalibyśmy, gdybyśmy mogli przetworzyć w pracę całe ciepło, zawarte w otaczających

nas ciałach. Ale to nie daje się osiągnąć, dlatego właśnie, że zawarta w nich energja (o ile nie powstają różnice temperatur wskutek działania słońca) jest już rozłożona w sposób prawie najbardziej prawdopodobny, i dlatego na niepowodzenie skazane są wszelkie próby rozłożenia jej w sposób inny, lepiej odpowiadający naszym celom. Natomiast pomiędzy słońcem i ziemią panuje olbrzymia różnica temperatur; energja jest więc podzielona pomiędzy te dwa ciała w sposób bynajmniej nie odpowiadający prawom prawdopodobieństwa. Wyrównywanie temperatur pomiędzy niemi, uwarunkowane dążeniem do większego prawdopodobieństwa, trwa, dzięki olbrzymim odległościom i rozmiarom, całe miljony lat. Postaci pośrednie, jakie energja słońca przybiera, zanim spadnie do temperatury ziemi, mogą być dość nieprawdopodobne; możemy z łatwością spożytkować przechodzenie ciepła od słońca do ziemi, tak jak przechodzenie od wody w kotle parowym do wody w chłodnicy maszyny parowej.

Walka o byt stworzeń żywych nie jest więc walką o pierwiastki chemiczne — te pierwiastki są obecne w nadmiarze w powietrzu, wodzie i glebie — także nie o energję, gdyż ta zawarta jest pod dostatkiem — niestety, w postaci nie podlegającej przemianom — we wszystkich ciałach; walka toczy się o entropję, która, przy przechodzeniu energji od gorącego słońca do chłodnej ziemi, może być zużytkowana. Dla najlepszego wyzyskania tego przejścia roztaczają rośliny niezmierzoną powierzchnię swych liści i w sposób jeszcze niezbadany zmuszają energję słońca, zanim spadnie na poziom cieplny naszej ziemi, do wytwarzania takich syntez, o jakich nasze laboratorja nie mają pojęcia. Produkty tej kuchni chemicznej stanowią przedmiot walki świata zwierzęcego"...

Rozumowanie B o l t z m a n n a objaśnia, dlaczego ruchy drobinowe, choć każdy z nich może być uważany za odwracalny, rozpatrywane jako całość, wykazują pewną tendencję, którą najzwięźlej ujmuje zasada entropji. Słuszności samej zasady B o l t z m a n n nie kwestjonuje, ani nie ogranicza; uważa ją za regułę ogólną, niepodlegającą wyjątkom. Jeśli jednak uważamy zjawiska termodynamiczne za zjawiska tłumne, a prawa fizyki za „przybliżenie ważne reguły przeciętnego przebiegu zjawisk" (ob. str. 364), to i druga zasada musi stracić swój charakter bezwzględny, musi dopuścić możliwość wyjątków.

Analizą tego zagadnienia zajął się znakomity fizyk polski, Marjan Smoluchowski. Wskazał on, że zjawiska fluktuacyj oraz ruchów Browna istotnie wykraczają przeciw drugiej zasadzie, że więc „spada ona do rzędu prawidła, ważnego tylko w grubszem przybliżeniu". Czytelnik znajdzie nieco bliższych szczegółów w następnym rozdziale.

Rozdział IV.

DOŚWIADCZALNE DOWODY ISTNIENIA RUCHÓW DROBINOWYCH.

WSZYSTKIE przytoczone dotychczas dowody, przemawiające za słusznością hipotezy o atomowej i drobinowej budowie ciał, są tylko dowodami pośredniemi. Ich siła przekonywająca polega na zgodności, jaką wykazują z jednej strony wyniki rozumowań teoretycznych, opartych na tej hipotezie, a z drugiej — wyniki pomiarów zjawisk ciągłych, makroskopowych. Zjawiska te nie dają jednak dowodu bezpośredniego ani nieciągłości w budowie materji, ani istnienia ruchów nieustannych najdrobniejszych jej elementów. Bez takiego dowodu można teorję atomową uważać za wytwór ludzkiego umysłu jedynie i powątpiewać, czy stworzonym przez nas fikcjom odpowiada coś rzeczywistego.

Koniec XIX stulecia dostarczył więcej niż jednego takiego dowodu. Rozciągnięcie teorji atomowej na zjawiska elektryczne rozszerzyło potężnie ramy teorji i pozwoliło na nowym gruncie poszukiwać i znaleźć zjawiska, świadczące niezbicie o nieciągłości elementarnych procesów fizycznych (promienie jonowe i elektronowe, zjawiska promieniotwórcze, pomiary Millikana naboju elementarnego — ob. odpowiednie rozdziały w t. II).

Bardziej jeszcze bezpośrednich dowodów dostarczyły dwie inne grupy zjawisk: rozpraszanie światła, spowodowane nieciągłością materji (opalescencja), oraz ruchy zawiesin (emulsyj), złożonych z cząsteczek niezmiernie drobnych, wprawdzie dostrzegalnych jeszcze zapomocą silnych mikroskopów, ale już nieco zbliżonych do rozmiarów drobin (ruchy Browna). Przenikliwą i przekonywającą teorję obu kategoryj zjawisk dał Marjan Smoluchowski. Poniżej przytaczamy wyjątki z jego rozprawy „o fluktuacjach termodynamicznych", w której streścił wyniki swych głębokich i doniosłych dociekań, oraz w związku z nimi pozostające wywody, dotyczące granic stosowalności dru-

giej zasady termodynamiki. Dalej umieszczono urywki z książki „o atomach" J. Perrin'a, który najbardziej przyczynił się do doświadczalnego opracowania sprawy ruchów i rozkładu cząstek zawiesin. Wreszcie znajdzie czytelnik ustęp o „promieniach atomowych", wykazujących bezpośrednio wielkie prędkości, jakiemi są obdarzone drobiny materji w stanie gazowym.

MARJAN SMOLUCHOWSKI.

(1872 — 1917).

Smoluchowski urodził się dn. 28.V. 1872 r. pod Wiedniem; w Wiedniu też pobierał nauki w gimnazjum i uniwersytecie. Po zdaniu doktoratu studjował dalej w Paryżu, Glasgowie i Berlinie. W roku 1902 został powołany, jako profesor fizyki, do Lwowa, a w roku 1913 na opróżnioną po śmierci Witkowskiego katedrę fizyki w Uniwersytecie Jagiellońskim.

Całą niemal działalność naukową poświęcił Smoluchowski rozwijaniu teorji atomistycznej, przewidując jej świetny rozwój i triumf w epoce, która zwątpiła w jej słuszność i płodność. Pierwszem jego doniosłem odkryciem, dokonanem przy badaniu przewodnictwa gazów silnie rozrzedzonych, było wykazanie możliwości istnienia skoku temperatury pomiędzy takim gazem a ściankami naczynia; to studjum uzupełnił później teorją przewodnictwa cieplnego ciał sproszkowanych.

Zapoznawszy się ze zjawiskiem ruchów Browna, obcem ogółowi fizyków ówczesnych, zrozumiał odrazu jego doniosłość dla fizyki atomowej i w r. 1906 ogłosił teorję tego ruchu, opartą na rozważaniu ruchu drobin materji (w r. 1905 Einstein ogłosił teorję tego samego zjawiska, opartą na zupełnie ogólnych rozważaniach mechaniki statystycznej). Później Smoluchowski powracał niejednokrotnie do niektórych szczegółów teorji i do tematów, związanych z ruchami Browna. W r. 1908 objaśnił zagadkowe zjawisko opalescencji w stanie krytycznym i tem rozpoczął ogólne rozważania nad „fluktuacjami", czyli przypadkowemi zagęszczeniami i rozrzedzeniami drobin, wywołanemi przez ich nieregularne ruchy. Po kilku drobniejszych przyczynkach zajął się (1913) sprawą granic stosowalności II zasady termodynamiki. Jego świetne, głębokie uwagi wyjaśniły subtelne i zawiłe zagadnienie i rozproszyły niejasność, jaka panowała na punkcie stosunku zjawisk mechanicznych do termodynamicznych.

Poza tą główną linją działalności naukowej, Smoluchowskiego obchodziły i inne zagadnienia. 112 rozpraw w różnych językach, z których wszystkie ważniejsze zostały zebrane w trzech obszernych tomach, wydanych przez Polską Akademję Umiejętności [1]), wskazuje skalę jego zainteresowań; jonizacja przez promienie Röntgena, endosmoza elektryczna (porywanie cząstek materji przez prąd elektryczny), żyły w strumieniach cieczy, teorja roztworów, koagulacja zawiesin, atmosfera ziemi i planet, teorje górotwórcze — przyciągały jego uwagę.

Kreśląc życiorysy Kelvina, Olszewskiego, Rudzkiego, wykazał, jak umiał cenić pracę twórczą innych umysłów. Choć wychowany na obczyźnie, nie tracił poczucia łączności z nauką polską; świadczy o tem szkic o „historji fizyki w Polsce", ogłoszony w „Poradniku dla Samouków" (1917). W tem samem wydawnictwie opracował świetnie dział fizyki, a w „Nauce Polskiej" ogłosił pracę o „organizacji i działalności zakładów fizycznych w Polsce" (1918).

Przedwczesna śmierć wskutek choroby zakaźnej przerwała działalność genjalnego umysłu w całej pełni rozkwitu, w chwili, gdy rosnąca jego potęga docierała do coraz głębszych zagadnień nauki.

Był prosty, skromny, ujmujący w obejściu, chętny i uczynny: nietylko wielka umysłowość, ale i piękna ludzka dusza.

O fluktuacjach termodynamicznych i ruchach Browna [2]).

Wstęp.

Indukcyjny charakter Fizyki pociąga za sobą tę konsekwencję, iż żadnej hipotezy w Fizyce nie możemy udowodnić w tem znaczeniu, w jakiem używamy słowa „dowód" w Matematyce. Jeżeli dbamy o ścisłość terminologji, nie powinniśmy wogóle mówić o „prawdziwości" żadnej teorji fizycznej, ani nawet o jej prawdopodobieństwie, tylko o jej większej lub mniejszej użyteczności...

Mimo to zdarza się i dzisiaj, że znajdujemy tak systematyczne potwierdzenia pewnej teorji, tak zadziwiające sprawdzenia wniosków, początkowo wzbudzających nieufność, że zdaje się nam, jakoby zaufanie nasze do danej teorji zyskało podstawy wprost namacalne, choć nauka ostrzega nas przed bezwzględną wiarą...

---

[1]) Pisma Marjana Smoluchowskiego. Kraków, 1924—1928.

[2]) „Prace Matematyczno-Fizyczne", r. 1914. Rozprawa wyszła w oddzielnej odbitce.

Do rzędu teoryj, takie niezwykłe wzbudzających zaufanie, przybyła w nowszych czasach także atomistyczno-kinetyczna teorja materji. Zyskała ona po dłuższym okresie upadku tak jaskrawe potwierdzenia, z zarzutów przeciwko niej podnoszonych wyrosły tak niespodziewane „dowody", że utwierdziło się jej stanowisko, jako jednej z najpewniejszych i najważniejszych teoryj fizycznych. Dowodów tych (w znaczeniu ograniczonem słowa) dostarczyły głównie badania dwu kategoryj zjawisk: właściwości gazów rozrzedzonych oraz fluktuacyj termodynamicznych.

Badania nad gazami rozrzedzonymi wykazały istotne znaczenie pojęcia t. zw. „drogi swobodnej" drobin i tem samem stwierdziły słuszność nowszych pojęć o drobinowej strukturze gazów. Pomiary Maxwella, a później Kundta i Warburga, sprawdziły nieprawdopodobnie brzmiące przypuszczenie teorji kinetycznej: że lepkość gazu nie zależy od stopnia jego rozrzedzenia, że natomiast przy bardzo wielkich rozrzedzeniach, gdy swobodna droga drobin jest porównalna z rozmiarami naczynia, występuje ślizganie się gazu wzdłuż ścian naczynia, dające się także ilościowo dokładnie określić jako funkcja drogi swobodnej.

Zupełnie analogiczne zjawisko znalazł autor niniejszego referatu, zgodnie z teorją, w zakresie przewodnictwa cieplnego, a doszedł równocześnie do wniosku dalszego, że w gazach bardzo rozrzedzonych (gaz ultrararéfiés), — t. j. gdy droga swobodna większa jest niż rozmiary naczyń — zjawisko przewodnictwa powinno się odbywać w sposób zupełnie różny od normalnego. Dzięki wydoskonaleniu techniki eksperymentalnej (pompa Gaedego i t. p.), Knudsen zdołał stwierdzić doświadczalnie nietylko te wnioski, ale również inne ciekawe konsekwencje teoretyczne...

Jakkolwiek ważnem jest jednak doświadczalne sprawdzenie owych przewidywań teorji kinetycznej w zakresie Fizyki gazów rozrzedzonych, jako dowód słuszności naszych poglądów na strukturę drobinową gazów, przecież druga kategorja zjawisk—badania nad fluktuacjami — posiada jeszcze wiele donioślejsze ogólne znaczenie, gdyż wiążą się one bezpośrednio z zasadniczym rysem teorji kinetycznej, który w przeciwstawieniu do poglądu termodynamicznego podkreśla pewien indeterminizm[1]) makroskopijnych zjawisk materjal-

---

[1]) [Prawa zjawisk makroskopowych, t. j. takich, jakie ujmujemy naszemi zmysłami i mierzymy zapomocą naszych przyrządów, mają postać twierdzeń bezwzględnie pewnych; o ile tylko znamy dokładnie prawa, rządzące zjawiskiem,

nych, pociągający za sobą wprowadzenie w dziedzinę Fizyki pojęć przypadku i prawdopodobieństwa i wyrażający się już w zewnętrznej formie tej teorji: używaniem statystycznej metody rozumowania [por. str. 364].

Wcieleniem owego indeterminizmu jest w dawnej klasycznej teorji kinetycznej słynne prawo rozdziału prędkości drobinowych, wygłoszone przez Maxwella w roku 1860 [ob. str. 363]. Nietylko kierunek prędkości każdej drobiny jest przypadkowy, ale tak samo od przypadku zależy jej wielkość. Waha się ona około pewnej wartości średniej i tylko ta wartość średnia jest ściśle określona przez temperaturę gazu. Jest to pierwszy przykład zjawisk, które dzisiaj określamy ogólną nazwą „fluktuacyj", i któremi w niniejszem studjum bliżej zająć się zamierzamy.

I. Fluktuacje gęstości.

§ 1. *Prawdopodobieństwo obecności pewnej liczby drobin w danej przestrzeni.* Istotę zjawisk fluktuacyjnych najlepiej zrozumiemy, roztrząsając najprzód najprostszy przykład takich zjawisk, a następnie stopniowo uogólniając poznane prawidła. Tym najprostszym przykładem są fluktuacje gęstości gazu idealnego, znajdującego się w stanie równowagi termodynamicznej, i od nich też rozpocząłem systematyczne badanie tych zjawisk w r. 1904. Wyróżnia się on między innemi tem, że można go zanalizować teoretycznie prostym sposobem

---

i znamy początkowy stan układu, możemy przewidzieć najdokładniej przebieg zjawiska: jest ono ściśle wyznaczone, zdeterminowane, niema w niem miejsca na przypadek (np. znając masę gazu, jego objętość, temperaturę i ciężar drobinowy, możemy z całą dokładnością obliczyć jego ciśnienie). Inaczej rzecz się przedstawia, gdy na zjawisko spojrzymy ze stanowiska teorji kinetycznej. Choć ruch każdej drobiny jest zdeterminowany przez prawa mechaniki, to jednak ruchy poszczególnych drobin nie są przystępne kontroli naszych zmysłów; dlatego nie możemy przewidzieć dokładnie ich przebiegu, mają one dla nas charakter nieprzewidziany, przypadkowy. Stąd i zjawiska makroskopowe, wywołane przez ruchy drobin, noszą cechę pewnej przypadkowości; gdy operujemy wielkiemi masami, obejmującemi niezliczone ilości drobin, przypadkowe odchylenia od przeciętnego przebiegu wyrównywają się i zjawisko wydaje się nam podległe ścisłym prawom fizyki makroskopowej. Charakter przypadkowy występuje wyraźnie, gdy przechodzimy do względnie szczupłych rozmiarów zjawiska: liczba drobin, wchodzących w grę, jest zbyt mała, aby przypadkowe odchylenia mogły się wyrównać, i obserwowane przez nas zjawisko makroskopowe ulega również odchyleniom czyli fluktuacjom (rozmiary cząstek zawiesiny są tak drobne, że ciśnienia, wywierane z różnych stron przez uderzenia drobin, nie są sobie naogół równe, cząstka przesuwa się w kierunku najmniejszego ciśnienia)].

bezpośrednim, nie wymagającym wcale powoływania się na ogólne wzory Mechaniki statystycznej.

W klasycznej teorji kinetycznej przyjmuje się zawsze, że liczba drobin, zawartych w pewnej objętości gazu, jest proporcjonalna do tejże objętości, tak jak gdyby chodziło o substancję ciągłą, i wszystkie obliczenia Maxwella, Clausiusa, Boltzmanna, w nowszych czasach Langevin'a, Jeansa, J. J. Thomsona i t. d. opierają się na tem założeniu. Widocznie jednak przyjęcie takie musi za sobą pociągać błędy, zpowodu nieciągłości drobinowych, gdy chodzi o przestrzenie, których rozmiary są tego rzędu wielkości (albo też mniejsze), jak odległości drobinowe. Ale nawet i w większych przestrzeniach wadliwość jego musi występować, gdyż drobiny w gazie idealnym nie będą ułożone w regularnych odstępach— jak to zapewne ma miejsce w kryształach — tylko zupełnie przypadkowo, a wskutek tego muszą występować przypadkowe ich nagromadzenia i rozrzedzenia.

Autor oblicza prawdopodobieństwo, aby pewna liczba n zpośród N drobin, wpuszczonych do objętości V, znalazło się jednocześnie w pewnej części v tej objętości. To służy do obliczenia innej, ważnej wielkości:

§ 3. *Średnie i przeciętne odchylenie. Prawdopodobieństwo pewnego zgęszczenia.* Nierównomierność przypadkowego układu drobin ocenić się daje według „przeciętnej" lub „średniej" wielkości odchylenia rzeczywistej liczby n od normalnej ich liczby ν.

Określenia te są rozumiane w następujący sposób: Jeśli N drobin znajduje się w objętości v, na maleńką objętość ω przypada pewna przeciętna ich liczba $\nu=\frac{N\omega}{v}$; tę liczbę nazywamy normalną. Rzeczywista liczba drobin, mieszcząca się w pewnej chwili w tej objętości, wynosi n, istnieje więc pewien nadmiar (dodatni lub ujemny) $n-\nu$. Stosunek tego nadmiaru do liczby normalnej nazywamy zagęszczeniem δ.

$$\delta=\frac{n-\nu}{\nu}$$

„Odchylenie przeciętne" pewnej serji obserwacyj obliczamy, sumując wartości bezwzględne $|\delta|$ obserwowanych wartości δ i dzieląc sumę przez liczbę obserwacyj. Oznaczamy to przez symbol $\overline{|\delta|}$.

„Odchylenie średnie" obliczamy, jak następuje: tworzymy kwadraty δ^2 wszystkich wartości, znajdujemy średnią wartość tych kwadratów i z tak znalezionego średniego kwadratu wyciągamy pierwiastek. Symbol $\sqrt{\overline{\delta^2}}$

Obie te wielkości dają się łatwo obliczyć... Dla średniego odchylenia otrzymuje się... wzór:

$$\sqrt{\overline{\delta^2}} = \frac{1}{\sqrt{\nu}},$$

który wskazuje, że wielkość ta zależy wyłącznie od liczby normalnie przypadającej na daną przestrzeń i jest do pierwiastka z niej odwrotnie proporcjonalna.

W dalszym ciągu Smoluchowski rozważa wpływ, jaki na powstawanie zgęszczeń mogłyby mieć siły międzydrobinowe. Zrozumiałe bez żadnego rachunku twierdzenie, że siły przyciągające muszą się przyczyniać do powiększania owych przypadkowych nierównomierności, a siły odpychające będą miały skutek przeciwny, autor wyprowadził w sposób ścisły w rozprawach z r. 1908 i 1910.

Te tendencje występują w sposób szczególnie silny w pewnych wypadkach osobliwych, które sprzyjają występowaniu nierównomierności gęstości. Taki stan osobliwy osiąga materja w pobliżu punktu krytycznego. [Przegięcie izotermy w tym punkcie wskazuje, że względnie sporym zmianom objętości mogą towarzyszyć znikomo małe zmiany ciśnienia; gromadzeniu się drobin w jednych miejscach na koszt miejsc sąsiednich nie przeciwdziałają więc różnice ciśnień, jak to się dzieje w warunkach zwykłych].

§ 8. *Teorja opalescencji ośrodków pozornie jednorodnych.* Dotychczasowe nasze rozważania miały charakter wyłącznie teoretyczny; obecnie zaś zajmiemy się pytaniem, czy obecność owych fluktuacyj gęstości... nie objawia się może bezpośrednio w jakichś zjawiskach, dostępnych kontroli doświadczalnej. Pod tym względem wskazałem w drugiej z cytowanych prac zjawisko Tyndalla, czyli „Opalescencji", które występuje bardzo wybitnie w gazach, gdy znajdują się niedaleko punktu krytycznego, a podobnie też w podwójnych mieszaninach cieczy, w pobliżu t. zw. krytycznego punktu rozpuszczalności [1]).

Jeżeli np. rurkę Natterera, ogrzaną powyżej temperatury krytycznej, powoli ochładzamy, przepuszczając przez nią równocześnie snop intensywnego światła, zawartość zaczyna wysyłać wyraźne niebieskawe światło opalescencji, w obrębie 1 do 2 stopni powyżej temperatury krytycznej, a natężenie tego światła wzrasta aż do chwili, kiedy menisk się okazuje i ciecz oddziela się od gazu. Także

[1]) [Jeśli 2 ciecze A i B, rozpuszczając się wzajemnie, ale tylko do pewnego stopnia, zmieszać z sobą, to wytworzą się dwie fazy: stężony roztwór B w A i stężony roztwór A w B. Przy podnoszeniu temperatury różnica w składzie obu faz zmniejsza się, aż wreszcie w temperaturze krytycznej oba roztwory osiągają jednakowe stężenie i podział na 2 fazy zanika, podobnie jak zanika różnica pomiędzy cieczą i parą w stanie krytycznym].

w fazie ciekłej jeszcze przez jakiś czas trwa to zjawisko, ale zanika przy dalszem stygnięciu.

W myśl poglądów R a y l e i g h'a, który teorji zjawiska T y n d a l l a poświęcił szereg klasycznych w historji nauk prac, występowanie tego zjawiska dowodzi, że ośrodek ten jest pod względem optycznym niejednorodny, a mianowicie, że rozmiary ziarn optycznie różnorodnych, które powodują dyfrakcję [uginanie] światła, są małe w porównaniu z długością fal świetlnych...

Autorowie, którzy badali opalescencję krytyczną, nie mogli sobie wytłumaczyć, skąd pochodzi owa niejednorodność fazy ciekłej i gazowej — zupełnie zagadkowa z punktu widzenia Termodynamiki — i wymyślali w tym celu bardzo sztuczne hipotezy. Według teorji kinetycznej zaś tłumaczy się cała sprawa w bardzo prosty sposób, jako optyczny skutek owych nierównomierności gęstości ośrodka...

Autor wyprowadza wzór na spółczynnik absorbcji, spowodowanej przez fluktuacje; E i n s t e i n, pogłębiwszy stronę optyczną, doszedł do takiego samego wzoru. K e e s o m i K a m e r l i n g h O n n e s, badając etylen w pobliżu punktu krytycznego, doszli do wyników, w przybliżeniu zgodnych z teorją. Pomiary podobne nastręczają znaczne trudności.

Zjawisko błękitu nieba da się też podciągnąć pod tę teorję. Lord R a y l e i g h wytłumaczył je jako skutek opalescencji, spowodowanej przez drobiny powietrza, uważał zatem powietrze za „mętny ośrodek, składający się z próżni i zawieszonych w niej drobin gazowych". Warunkiem koniecznym, aby wzory R a y l e i g h a mogły być stosowane, jest nierównomierność rozkładu drobin powietrza; teorję R. można więc uważać za specjalny wypadek teorji opalescencji autora. Wł. N a t a n s o n wydoskonalił teorję R., opierając ją na rozważaniu drgających elektronów.

W r. 1916 S m o l u c h o w s k i zdołał urzeczywistnić sztuczny błękit w powietrzu, oczyszczonem starannie ze wszelkich pyłków; zamknięte w rurze i silnie oświetlone, rozpraszało światło krótkofalowe i dla obserwatora, patrzącego przez boczny otwór, wydawało się, na czarnem tle, zabarwione błękitnie.

§ 12. *Wykazanie fluktuacyj gęstości w emulsjach.* Jeżeli z właściwych, „amikroskopowych" roztworów koloidalnych przejdziemy do zawiesin cząstek, dostrzegalnych ultramikroskopem [1]) lub mikro-

---

[1]) [Uginanie się światła zakreśla granice powiększenia mikroskopu. Bardzo drobne ciałka mogą wytworzyć wyraźne obrazy tylko wtedy, gdy ich rozmiary są przynajmniej równe długości fali świetlnej, użytej do obserwacji. Jeśli jednak chodzi nie o rozpoznanie kształtu i wielkości np. cząstki zawiesiny, lecz tylko o stwierdzenie jej obecności, można uciec się do t. zw. metody ultramikroskopu (S i e d e n t o p f i Z s i g m o n d y, 1903); polega ona na silnem bocznem oświetleniu preparatu (prostopadle do osi optycznej mikroskopu). Drobne cząstki, jak wykazał R a y l e i g h, rozpraszają światło i obserwatorowi, patrzącemu przez

skopem, otwierają się nowe możliwości doświadczalnego skontrolowania i zużytkowania wzorów, gdyż wówczas można bezpośrednio zliczyć cząstki, zawarte w jednakowych objętościach — albo lepiej: można obserwować wciąż tę samą przestrzeń i powtarzać wyznaczenia liczby cząstek, w niej zawartych, w regularnych przedziałach czasu. Tym sposobem odchylenia od liczby przeciętnej ν dają się empirycznie określić.

Wykonaniem takich pomiarów zajął się pierwszy Svedberg (1910), posługując się przytem bardzo prostą metodą eksperymentalną: obserwował koloidalne zawiesiny złota lub innych substancyj (rtęci, selenu, gumiguty, tłuszczów) zapomocą ultramikroskopu, którego pole widzenia tak było zwężone (przez wstawienie odpowiedniej zasłony), że widoczną w niem była tylko mała, odrazu wyznaczyć się dająca liczba cząstek. Oświetlając preparat tylko chwilowymi błyskami światła (39 razy na minutę), otrzymał np. w jednym przypadku szereg 517 liczbowych wyznaczeń, którego początek poniżej podajemy:

$$n = 12000200132412310211113112511102331...$$

Średnia liczba ν, wynikająca z całego szeregu, jest $\nu = 1{\cdot}55$. Widzimy zatem, że liczba cząstek, obecnych w danej przestrzeni, nie jest niezmiennie określona, nie wynosi 1 lub 2, jakby musiało być w razie równomiernego rozdziału, lecz waha się bardzo znacznie, między granicami 0—5 (a w całym szeregu dochodzi kilkakrotnie do 7). Czy układ cząstek zaś jest zupełnie przypadkowy, to skontrolujemy, obliczając empiryczne wartości średniego lub przeciętnego odchylenia.

Otrzymuje się:

$$\delta^2 = 0{\cdot}637,$$

podczas gdy z wzorów teoretycznych (5) i (6) wynikałoby $\delta^2 = 0{\cdot}645$. Zgodność jest zatem zupełnie zadawalająca.

Podobne pomiary wykonał też Iljin [1913], używając jednorodnych rozrzedzonych emulsyj gumiguty, i otrzymał również wyniki, potwierdzające zupełnie owe wzory.

Jako przykład podajemy zestawienie stu pomiarów, odnoszących się do pewnego przypadku, kiedy przeciętna liczba cząstek, znajdu-

mikroskop o silnem powiększeniu, wydają się punkcikami, świecącemi na ciemnem tle. W ten sposób można dostrzegać położenia, ruchy i liczbę cząstek, niedostrzegalnych zapomocą zwykłych metod mikroskopowych].

jących się w polu widzenia, była 1,50. W drugiej kolumnie podajemy, jak często zauważono pojawienie się n cząstek, a w trzeciej kolumnie odnośne wartości, obliczone na mocy naszych wzorów.

n	*P obs.*	*P. obl.*
0	22	22
1	33	34
2	26	25
3	13	13
4	4	5
5	2	1

$$|\bar{\delta}|\ obs. = 0{,}66$$

$$|\bar{\delta}|\ obl. = 0{,}67$$

$$\sqrt{\bar{\delta^2}}\ obs. = 0{,}64$$

$$\sqrt{\bar{\delta^2}}\ obl. = 0{,}67$$

Zgodność liczb drugiej i trzeciej kolumny, a tak samo wartości przeciętnego odchylenia, jest wprost zadziwiająca, lepsza nawet, niż można się było spodziewać, uwzględniając stosunkowo małą liczbę obserwacyj.

Dowodzi to wszystko, że w tego rodzaju zawiesinach koloidalnych i emulsjach cząstki istotnie się zachowują jak drobiny gazu idealnego, t. j. że nie podlegają żadnym siłom międzydrobinowym.

II. Ruchy Browna.

§ 16. *Zarys historyczny.* Dzieje wiadomości naszych o t. zw. ruchach B r o w n a stanowią tak ciekawy rozdział w historji Fizyki, że wypada im na tem miejscu poświęcić kilka słów. Dowodzą one bowiem, jak zjawisko, od dawien dawna znane i niezliczone razy obserwowane przez badaczy, zajętych pracami mikroskopowemi, mogło pójść w niepamięć i doznawało pogardy ze strony nauki oficjalnej, zapoznawającej przez długie lata jego właściwą istotę. Pokazują też, jak puste i bezpłodne są usiłowania eksperymentatorów, nie kierujących się teorją racjonalną, jak wreszcie zjawisko pogardzane odrazu się wyjaśnia i nabiera pierwszorzędnego znaczenia, jako ważne ogniwo w dzisiejszym poglądzie atomistycznym, gdy tylko teorja właściwa dała klucz do jego zrozumienia i bliższego zbadania.

Nazwa „ruchu drobinowego" pochodzi od angielskiego botanika B r o w n a, który w r. 1827 zauważył przy badaniach mikroskopowych, że drobne ziarnka skrobi, zawieszone w cieczy, wykonywają nieregularne, trzęsące ruchy, przypominające ruchy roju komarów albo gromady mrówek, a przy bliższem badaniu przekonał się, że jest to zjawisko ogólne, wykazywane przez jakiebądź drobne cząstki sub-

stancyj organicznych lub też anorganicznych, jeżeli się znajdują w takich warunkach...

Z nazwą ową Brown łączył zresztą myśl nieco odmienną od naszego dzisiejszego poglądu, gdyż przez molekuły — pojęcie wówczas jeszcze nie tak wyraźnie skrystalizowane, jak dzisiaj — rozumiał właśnie owe drobne, poruszające się cząstki; więc nazwa oznaczała tylko fakt zauważony, bez jakiejkolwiek myśli jego wytłumaczenia.

W późniejszych czasach natomiast pojawiło się więcej pomysłów wytłumaczenia, niż istotnych przyczynków do znajomości zjawiska samego. Powodem jego powstawania miały być: wewnętrzna cyrkulacja wśród cieczy, prądy konwekcyjne, wywołane przez promienie cieplne, pochłonięte przez cząstki, zjawiska radjometryczne, różnice napięcia włoskowatego wskutek zanieczyszczeń, nierówności napięcia włoskowatego wskutek ogrzania, siły elektryczne, specyficzne siły odpychające i t. d. Niektórzy wreszcie autorowie upatrywali w tem zjawisku objaw wewnętrznych ruchów drobinowych, wśród cieczy panujących, nie potrafili jednak naogół podać argumentów decydujących na korzyść tej interpretacji. Z pomiędzy tych ostatnich najtrafniejszemi z dzisiejszego punktu widzenia wydają się nam rozważana Gouy'a; autor ten istotnie zdołał swemi doświadczeniami do pewnego stopnia wykazać niezależność owego zjawiska od takich zewnętrznych okoliczności, jak natężenie oświetlenia, wstrząśnienia, parowanie cieczy i t. d., co w związku z jego powszechnością wyklucza zgóry przeważną część innych, wymienionych poprzednio hipotez.

Pozostawało jednak nietknięte właściwe jądro tej kwestji: t. j. czy zjawisko obserwowane odpowiada ilościowo wymogom teorji atomistyczno-kinetycznej. Pod tym względem zdawała się istnieć sprzeczność zasadnicza. Prędkości cząstek, podane np. przez F. Exnera, wynosiły mniej więcej 0.0003 cm./sek. (dla cząstek gumiguty o średnicy 0.001 mm. w wodzie). Tymczasem przyjmując, zgodnie z teorją kinetyczną, że średnia energja drobin cieczy musi się równać energji kinetycznej owych cząstek, otrzymałoby się prędkość teoretyczną rzędu 0.4 cm./sek., więc przeszło tysiąc razy większą.

Sprzeczności pomiędzy spostrzeżeniami różnych autorów oraz różnorodność i chwiejność teoretycznych tłumaczeń zapewne były powodem, że wogóle zjawisko to ignorowano, tak że w żadnem z obszernych dzieł i podręczników Fizyki (z jedynym wyjątkiem Lehmanna „Molekularphysik") aż do ostatnich lat ani wzmianki

o niem nie znajdujemy. Jak obcą zaś ogółowi uczonych była myśl o jego molekularno-kinetycznej istocie, tego dowodzi charakterystyczny fakt, że wówczas, gdy w ostatniem dziesięcioleciu ubiegłego wieku szkoła energetyków i fenomenalistów (Mach, Ostwald, Zermelo i t. d.) okrzyczała poglądy atomistyczno-kinetyczne jako naiwne, nienaukowe wierzenia, nie znalazł się nikt, nawet po stronie zwolenników owych poglądów, ktoby wskazał był na ruchy Browna, jako na oczywisty dowód termicznych ruchów drobinowych.

Gdy zaś w latach 1905 i 1906 pojawiły się prace teoretyczne Einsteina oraz autora niniejszego referatu, które obie, przy użyciu metod rozumowania całkiem odmiennych, prowadziły jednak do wyników zgodnych co do właściwej istoty ruchów Browna, eksperymentatorowie zajęli się tym przedmiotem na nowo, stosując jedyną właściwą w tym przypadku metodę badania, polegającą na sporządzeniu statystyki przesunięć, osiągniętych przez cząstki w pewnych czasach. Zrozumiano, że owe liczby, które Exner uważał za miarę prędkości cząstek, nie odpowiadają bynajmniej prędkości ruchu rzeczywistego, tylko są to wypadkowe przesunięcia, wynikające z geometrycznego składania wielkiej liczby drobnych wychyleń, posiadających wszystkie możliwe orjentacje w przestrzeni. Znikła zatem też sprzeczność wyżej zaznaczona, gdyż oczywiście przesunięcie, osiągnięte w jednostce czasu, musi być wielkością znacznie niższego rzędu, niż rzeczywista prędkość ruchu, odbywającego się po niezmiernie zawiłym, zygzakowatym torze [por. Perrin, str. 413].

Co do owych prac teoretycznych, zaznaczyć wypada pewną różnicę punktu wyjścia. Rozważania Einsteina mają charakter więcej abstrakcyjny, gdyż wypłynęły z ogólnych jego badań w zakresie Mechaniki statystycznej; on też pierwszy podał wzór teoretyczny, określający przesunięcia cząstek zawieszonych w cieczy; ale narazie pozostawił on kwestję otwartą, czy przewidziane teoretycznie zjawisko odpowiada temu, co znane było jako ruch Browna. Autor niniejszej pracy zaś przekonany był o molekularno-kinetycznej istocie ruchu Browna od roku 1900, kiedy się dowiedział z pracy Exnera o jego istnieniu, i od tego czasu usiłował stopniowo rozwijać jego teorję, rozważając zrazu prawdopodobny układ cząstek, następnie zjawiska ruchu, wynikające z kombinacji dróg swobodnych, wreszcie sam mechanizm ruchów cząstek, spowodowanych przez uderzenia drobin otaczających.

W rzędzie eksperymentatorów, którzy podjęli owe badania, należy

wymienić przedewszystkiem Svedberga i Perrin'a, wraz z ich współpracownikami. Zwłaszcza temu ostatniemu uczonemu udało się sprawdzić z wielką dokładnością wzory teoretyczne, odnoszące się do ruchów Browna, jako też do rozkładu cząstek w polu grawitacyjnem, tak że pomiary takie mogą naodwrót posłużyć do obliczenia liczby Avogadra, tej fundamentalnej stałej w teorji kinetycznej.

§ 17. *Przybliżone bezpośrednie obliczenie przesunięć w ośrodku ciekłym.* Zasadnicza myśl, na której spoczywa teorja ruchów Browna, jest przyjęcie, że cząstki zawiesiny (o pewnej temperaturze) zachowują się do pewnego stopnia analogicznie jak drobiny, a mianowicie, że średnia energja kinetyczna ruchu postępowego, wykonanego przez środek masy takiej cząstki, równa się średniej energji ruchu postępowego, jaką posiada drobina gazowa przy tejże temperaturze. Oznaczając masę cząstki przez M, masę drobiny przez m, prędkość cząstki przez C, prędkość drobiny przez c, mamy:

$$MC^2 = mc^2 = \frac{H\Theta}{N} \quad ^{1)}.$$

Przyjęcie to odpowiada podstawowemu założeniu teorji kinetycznej gazów i jest bezpośrednią konsekwencją Maxwella zasady ekwipartycji energji [2]. Analogja drobin gazowych i cząstek emulsji została zresztą także empirycznie stwierdzona w zjawiskach, omawianych w § 12.

W myśl tego, co poprzednio już powiedziano, nie chodzi jednak

---

[1]) [Θ oznacza tu temperaturę w skali bezwzględnej, N—liczbę Avogadra; H jest t. zw. stałą gazową, występującą we wzorze Clapeyrona:

$$pv = H.T.$$

Ponieważ v oznacza w tym wzorze objętość drobiny gramowej, jednakową dla wszystkich gazów, więc H ma wartość stałą, niezależną od jakości gazu, jest stałą uniwersalną].

[2]) [Prawo Daltona prowadzi do wniosku, że średnia energja kinetyczna drobin różnych gazów, mieszczących się razem w pewnej przestrzeni, jest taka sama. Maxwell uogólnił to w słynnem twierdzeniu o równym podziale (ekwipartycji) energji; twierdzenie to mówi, że, jeśli jakiekolwiek zbiorowisko drobin znajduje się w równowadze statystycznej, to średnia (w czasie) energja kinetyczna drobin jest taka sama dla wszystkich drobin. Twierdzenie to gra bardzo ważną rolę w mechanice statystycznej, jest ogólne i nie daje się wyprowadzić z żadnego innego, ogólniejszego, zasługuje więc na miano „zasady". Założenie, przyjęte w tym paragrafie przez Smoluchowskiego, jest rozciągnięciem zasady ekwipartycji energji na cząstki zawiesiny].

przy pomiarach doświadczalnych o prędkość C, tylko o przesunięcie, osiągnięte po upływie danego czasu, które jest sumą geometryczną wielkiej liczby drobnych przesunięć, dokonanych z prędkością średnią C we wszystkich możliwych kierunkach. Do ilościowej oceny tego przesunięcia można dojść różnemi metodami argumentacji.

Cząstka doznaje ustawicznych uderzeń ze strony drobin cieczy; impulsy uderzeń nie będą jednak rozmieszczone zupełnie równomiernie, lecz muszą powstać pewne przypadkowe nadwyżki. Ruch cząstki jest podobny do ruchów drobiny gazu; i tu i tam ruch składa się z szeregu „dróg swobodnych", po których drobina (wzgl. cząstka) porusza się bez zmiany kierunku. Zagadnienie sprowadza się do obliczenia średniego przesunięcia z pozycji pierwotnej, osiągniętego przez drobinę (wzgl. cząstkę) po przebyciu większej liczby dróg swobodnych we wszelkich możliwych kierunkach.

Autor oblicza prawdopodobieństwo takiego przesunięcia i dochodzi do wniosku, że średnia wartość kwadratu takiego przesunięcia, $\overline{\Delta x^2}$, osiągniętego w dłuższym czasie, jest proporcjonalna do czasu, a zatem samo średnie przesunięcie $\sqrt{\overline{\Delta x^2}}$ jest proporcjonalne do pierwiastka kwadratowego z czasu

$$\overline{\Delta x} = \sqrt{\overline{\Delta x^2}} = \sqrt{2\,Dt} = \sqrt{\frac{H\Theta}{N}\,\frac{t}{3\,\pi\mu a}}$$

Spółczynnik D jest tu spółczynnikiem dyfuzji cząstek zawiesiny, analogicznym do spółczynnika dyfuzji gazów; μ oznacza spółczynnik tarcia wewnętrznego (lepkości), a—promień cząsteczki; znaczenie Θ, N, H ob. odsyłacz na str. 395.

§ 18. *Dyskusja wyniku.*

...Podkreślimy następujące wnioski:

1) Średnie odległości Δx od pozycji początkowej wzrastają proporcjonalnie nie do czasu t, tylko do pierwiastka z czasu; jest to prawidło bardzo ogólne, cechujące zjawiska, które wynikają według zasad prawdopodobieństwa, jako wypadkowe z wielkiej liczby indywidualnych wydarzeń (mogących się równie dobrze przyczynić do całości w sposób dodatni, jak i ujemny). Rozumie się równocześnie, że nie można wcale podać „prędkości" ruchów Browna w zwykłem znaczeniu słowa, bo zależy wszystko od długości czasu obserwacji: im krótszy przeciąg czasu bierzemy pod uwagę, tem większy będzie stosunek: odległość/czas.

2) Ruch Browna jest całkiem niezależny od gęstości cząstek poruszających się i zależy tylko od ich rozmiarów. Rozumieć to można, zważywszy, że cząstka o większej masie M posiada wprawdzie mniejszą prędkość C, ale zato przez dłuższy czas τ odbywa drogę przybliżenie prostolinijną, tak że w wartości stosunku $C^2\tau$ wpływ masy znika zupełnie.

3) Ruchliwość B r o w n o w s k a jest odwrotnie proporcjonalna do spółczynnika lepkości cieczy. Od dawien dawna już zauważono, że np. w glicerynie ruchy te są bardzo słabe. Z drugiej strony także znany przyśpieszający wpływ podniesienia temperatury pochodzi przedewszystkiem od zmniejszenia lepkości.

4) Ruchy B r o w n a wzrastają w odwrotnym stosunku do promienia cząstek. Również i ten fakt był znany od samego początku, że mniejsze cząstki szybciej się poruszają od większych, ale dokładnych danych liczbowych dostarczyli dopiero późniejsi eksperymentatorowie.

§ 20. *Stwierdzenie doświadczalne prawa rozkładu przesunięć.* Wzór powyższy sprawdzili P e r r i n i C h a u d e s a i g u e s przy sposobności swych badań, obserwując przesunięcia Δx cząstek pewnej emulsji gumiguty (o promieniu $a = 2.212\,\mu$), doznaje w przedziałach 30-sekundowych. Tabliczka następująca wskazuje w pierwszym rzędzie wielkość przesunięć (w mikronach), w drugim rzędzie częstość owych przesunięć, doświadczalnie wyznaczoną, w trzecim rzędzie odpowiednie liczby, obliczone na podstawie wzoru, przy empirycznem określeniu spółczynnika.

Δx	0—1.7	— 3.4	— 5.1	— 6.8	— 8.5	—10.2	—11.9	—13.6	—15.3	—17.0
P. doś. . .	48	38	36	29	16	15	8	7	4	4
P. obl. . .	44	40	35	28	21	15	10	5	4	2

§ 30. *Ruchy B r o w n a cząstek zawieszonych w gazach.* Zdaje się, że pierwszy B o d a s z e w s k i w r. 1882 spostrzegł istnienie ruchów B r o w n a u cząstek zawieszonych w gazach (dymy salmiaku, tytoniu), a powtórzył jego doświadczenia L e h m a n n. Obserwacje te uległy jednak zapomnieniu i zwróciłem na nie dopiero w roku 1906 uwagę, widząc w nich poparcie kinetycznej teorji ruchów B r o w n a, gdy, rozwijając tę teorję, doszedłem do wniosku, że analogiczne, ale stosunkowo jeszcze wydatniejsze ruchy niż w cieczach, muszą występować w ośrodkach gazowych.

III. Rozkład emulsji w polu ciężkości.

§ 33. *Teorja.* Rozważania, dotyczące ruchów B r o w n a, opierały się wszystkie na analogji cząstek, zawieszonych w ośrodku płynnym, z drobinami gazowemi, analogji, która się wyraża ilościowo w tem, że energja kinetyczna ruchu postępowego w obu przypadkach musi być jednakowa. Porównanie to nasuwa dalszą konsekwencję, którą prawie równocześnie wypowiedział E i n s t e i n i autor niniejszego referatu, a której P e r r i n użył jako podstawy do najściślejszych swych wyznaczeń liczby N.

Emulsja, złożona z takich cząstek, musi pod wpływem ciężkości przyjąć rozkład analogiczny do rozkładu gęstości w atmosferze ziemskiej. Różnica będzie tylko ilościowa, zależnie od ciężaru cząstek oraz od gęstości ośrodka otaczającego, który w przypadku emulsji działa tak, jak gdyby zmniejszał natężenie ciężkości.

Pomiary P e r r i n'a i jego współpracowników potwierdziły wnioski, do których doprowadziła teorja S m o l u c h o w s k i e g o. Szczegóły tych pomiarów znajdzie czytelnik w dalszym ciągu tego rozdziału.

Granice ważności drugiej zasady termodynamiki[1].

W tak zatytułowanym wykładzie, wygłoszonym w cyklu wykładów, jakie zostały zorganizowane w r. 1913 w Gietyndze przy współudziale najznakomitszych sił naukowych, S m o l u c h o w s k i wziął za temat zbadanie tych punktów, w których wyniki badań drobinowo - statystycznych nie są w zgodzie z zasadami termodynamiki. Piękny, lecz trudny ten wykład przytaczamy tu w streszczeniu.

I.

§ 1. ...Nie łatwo jest dzisiaj wmyśleć się w nastrój, jaki panował pod koniec ubiegłego stulecia. Przodujący uczeni Niemiec i Francji byli — z małymi wyjątkami — przekonani, że teorja atomistyczno-kinetyczna skończyła swą rolę. W zaufaniu do wielkich sukcesów termodynamiki podniesiono prawidło, intuicyjnie poznane przez C a r n o t a i przezwane przez C l a u s i u s a drugą zasadą, do rzędu bezwzględnego dogmatu, ważnego ściśle i bez wyjątku. A że kinetyka drobinowa natknęła się na pewne trudności przy jej interpretowaniu, tam mianowicie, gdzie chodziło o przebiegi nieodwracalne, przeto potępiono ją razem z całą atomistyką i uznano za niewytrzymującą krytyki...

---

[1]) „Gültigkeitsgrenzen des zweiten Hauptsatzes der Wärmetheorie". Wydane w r. 1914 łącznie z całym cyklem wykładów gietyngeńskich.

Dziś sprawa przedstawia się odwrotnie, jak przed dwudziestu laty. Atomistykę uznano powszechnie za podstawę dzisiejszej fizyki, zaś druga zasada termodynamiki straciła raz na zawsze swe stanowisko niewzruszonego dogmatu, jednej z podstawowych zasad fizyki. Nikt przytem nie odmawia jej olbrzymiego praktycznego znaczenia, lecz teoretycznie spadła ona do rzędu prawidła ważnego tylko w przybliżeniu.

Powstaje więc zadanie bliższego sprecyzowania granic ważności drugiej zasady... Chodzi tu zasadniczo o te same zagadnienia, które stanowią rdzeń mechaniki statystycznej, rozwinętej przez Maxwella, Boltzmanna, Gibbsa i in. Tylko punkt widzenia jest tu inny. Gdy tamci badacze starali się wykazać, że wyniki statystyki drobinowej zgadzają się zasadniczo z termodynamiką, a różnice pomiędzy nimi są praktycznie bez znaczenia, my rozpatrzymy właśnie te punkty, w których różnice obu poglądów najwyraźniej występują.

Mechanika statystyczna zakłada, że układ drobin musi przejść z biegiem czasu przez wszystkie możliwe „stany mikroskopowe" (Mikrozustände), o ile tylko są one zgodne z warunkami kinetycznymi i energietycznymi. Przez „stan mikroskopowy" rozumie się przytem stan, w którym chwilowe wartości spółrzędnych każdej drobiny oraz jej prędkości (ilości ruchu) są nam dane.

Możliwe jest zatem, że układ, wychodząc z pewnego stanu, powróci do niego, a przynajmniej zbliży się do niego dowolnie blisko. Jednak czas, potrzebny do takiego powrotu, czyli t. zw. *cykl Poincaré'go - Zermelo,* może być niepojęcie wielki. Już Boltzmann obliczał, że na to, aby drobiny, znajdujące się w 1 cm.^{3} gazu, powróciły do pierwotnego rozkładu swych prędkości z dokładnością do 1 m./sek., potrzebny jest potwornie wielki *„czas powrotu"* rzędu $10^{10^{18}}$

W innem świetle przedstawi się ta sprawa, gdy będzie chodziło nie o stany mikroskopowe, abstrakcyjnie pomyślane, lecz o dostrzegalną rzeczywistość fizyczną. Obserwator stanów makroskopowych podobny jest do wodza. Nie obchodzi go historja indywidualnych drobin, wogóle indywidualność poszczególnych drobin materji jest mu obojętna, gdyż nie ma środków na jej zindentyfikowanie, a przy największem staraniu może zaledwie wyznaczyć liczby jednakowych drobin, znajdujących się w danej chwili w określonych położeniach i obdarzonych określonemi prędkościami... Podczas cyklu Poincaré'go-Zermelo będą przebieżone oczywiście wszystkie stany makroskopowe i to naogół wielokrotnie, lecz w różnej kolejności. Najważniejszą jest tu okoliczność, że różne stany makroskopowe powtarzają się niejednakowo często, czyli że ich prawdopodobieństwo jest bardzo nierówne...

Przeciętne zachowanie się układu skończonego w ciągu niezmiernie długiego czasu odpowiada temu, co w termodynamice nazywamy stanem równowagi. Te stany [makroskopowe], które dają się utworzyć przez największą liczbę permutacyj jednorodnych stanów mikroskopowych, występują nieporównanie częściej, odpowiadają więc maximum prawdopodobieństwa w znaczeniu drobinowo - statystycznem, a w znaczeniu termodynamicznem — maximum entropji. Dla krótkości będziemy je nazywali „stanami normalnemi". Ponieważ występują one w tak przeważającej liczbie, stan przeciętny w niezmiernie długim przeciągu czasu zgadza się z nimi bardzo blisko.

Lecz zdarzają się też, wprawdzie o wiele rzadziej, inne stany, odpowiadające znacznie mniejszej liczbie permutacyj. Układowi, który znajduje się właśnie w takim, mniej prawdopodobnym stanie — możemy go nazwać stanem „anormalnym" — przypisujemy mniejszą wartość chwilową entropji.

[To abstrakcyjne rozumowanie autora zilustrujemy prostym przykładem. W pewnej objętości mamy 4 drobiny, które oznaczymy literami *a*, *b*, *c*, *d*; dzielimy w myśli objętość na dwie połowy *A* i *B* i uznajemy położenie każdej drobiny za znane, jeśli wiemy, w której połowie się znajduje. Weźmy pod uwagę pewien określony rozkład drobin; np. równomierny ich podział w ten sposób, że w *A* znajdują się drobiny *a*, *b*, zaś w *B* drobiny *c*, *d*; to określa nam s t a n m i k r o s k o p o w y układu. Lecz od tego stanu możemy przejść do innych drogą permutacji drobin, t. j. zastępując jednę z drobin obszaru *A* przez jednę z drobin obszaru *B*; w ten sposób w obszarze *A* znajdą się kolejno drobiny: *ab*, *ac*, *ad*, *bc*, *bd*, *cd*. We wszystkich tych wypadkach s t a n m a k r o s k o p w y jest jeden i ten sam, gdyż ta sama liczba drobin (2) znajduje się w każdym z rozpatrywanych obszarów. Mamy więc 6 różnych stanów mikroskopowych, odpowiadających jednemu stanowi makroskopowemu, a mianowicie stanowi równomiernego rozkładu.

Przypuśćmy teraz, że mamy rozkład nierównomierny, że np. w obszarze *A* znajduje się tylko jedna drobina *a*, a w *B* — trzy pozostałe. Znajdziemy ogółem 4 równorzędne stany mikroskopowe, w których kolejno drobiny *a*, *b*, *c*, *d* znajdują się w *A*. Stanowi makroskopowemu, w którym *A* zawiera trzy drobiny, a *B* jedną — odpowiadają 4 różne stany mikroskopowe.

Wreszcie mamy tylko jeden stan mikroskopowy, odpowiadający zgromadzeniu się wszystkich czterech drobin w obszarze *A*, i jeden — zgromadzeniu wszystkich w obszarze *B*.

Jeśli drobiny będą przebiegały wszystkie możliwe stany mikroskopowe, to stany, odpowiadające obecności w *A* dwóch drobin, powtórzą się sześciokrotnie, skupieniu w *A* trzech drobin — czterokrotnie, zgromadzeniu się tam wszystkich — tylko raz jeden. Liczby 6, 4 i 1 wyrażają więc względne prawdopodobieństwa tych różnych stanów makroskopowych, termodynamicznych i są miarą odpowiadających im wartości entropji. Najwyższa odpowiada stanowi rozkładu równomiernego, stanowi „wyrównanemu"].

II.

Jeśli obserwujemy niezbyt wielką liczbę drobin, to możemy obserwować przypadkowe odchylenia od stanu normalnego, czyli *fluktuacje*. Ich istnienie przeczy zasadom termodynamiki, gdyż pomiędzy stanami normalnemi, posiadającemi największą entropję i, coprawda, występującemi najczęściej, możemy obserwować stany anormalne, a więc o zmniejszonej entropji.

Autor przytacza znane nam już (ob. str. 391) obserwacje Svedberga rozkładu ziarn koloidalnego złota.

W tym przykładzie ściśle jednakowe cząstki złota możemy rozpatrywać tak, jakgdyby były widzialnemi drobinami pewnej substancji, która drogą dyfuzji rozmieściła się niemal równomiernie w rozpuszczalniku, wodzie. Chwilowy stan mikroskopowy, zgodnie z podanem określeniem, byłby wyznaczony przez podanie położenia i prędkości wszystkich drobin wody i cząstek złota. Natomiast przy obserwacji stanu makroskopowego drobiny wody są zupełnie obojętne, ponieważ ich nie widzimy; interesuje nas jedynie liczba cząstek złota, znajdująca się w danej objętości. Każda cząstka może przytem oczywiście przyjąć z równem prawdopodobieństwem każde położenie wewnątrz naczynia i z biegiem czasu przebiegnie je wszystkie... Najbardziej prawdopodobny byłby równomierny rozkład cząstek w całej przestrzeni... Termodynamik spodziewałby się znaleźć niezmienną liczbę, w powyższym przykładzie jednę lub dwie cząstki. Tymczasem rzeczywista liczba odchyla się znacznie od tej przeciętnej.

Średnie odchylenie, obliczone według wzoru na str. 389, zgadza się zupełnie dobrze z obserwacją.

Można teraz zapytać: jak wielkie jest *największe odchylenie* od stanu normalnego, samorzutnie występujące w danym przeciągu czasu. W powyższym przykładzie przeciętne maksimum, obserwowane w czasie $\frac{1}{20}$ sekundy, wynosi 2,1; w czasie $\frac{1}{3}$ minuty: 3,7; w jednej minucie: 4,5; dla całej obserwacji, trwającej 13 minut: 7. Jest zrozumiałe, że im dłużej trwa obserwacja, tem większego maksimum możemy się spodziewać.

Podobne pytanie można postawić przy ruchach Browna:

Oddalenie cząstki zawiesiny od punktu wyjścia, liczone w pewnym kierunku, jest wynikiem przewagi liczby przesunięć, jakich cząstka doznaje w jednę stronę nad przesunięciami w stronę przeciwną. Chodzi teraz nie o średnie oddalenie cząstki od położenia pierwotnego, ujęte we wzór Smoluchowskiego-Einsteina, lecz o największe oddalenie, którego cząstka doznaje w serji n obserwacyj.

Odpowiedź wymaga dość zawiłych obliczeń, z których podam tu tylko wynik ostateczny: owa maksymalna przewaga jest przy bardzo dużej liczbie n z pewnem przybliżeniem proporcjonalna do wartości

$\sqrt{n \log n}$. Więc najwyższe oddalenie, osiągnięte w określonym czasie, jest naturalnie większe od oddalenia średniego; jest ono do niego w stosunku $\sqrt{\log n}$, przerasta je więc z czasem coraz bardziej, choć powoli [w miarę, jak rośnie liczba drobin n].

IV.

W ten sposób weszliśmy niepostrzeżenie w dziedzinę tych przebiegów, które termodynamika określa jako nieodwracalne i zahaczyliśmy o zagadnienie sporne, najgoręcej dyskutowane: jak można objaśnić kinetycznie naturę nieodwracalności, gdy wszystkie zjawiska ruchu są odwracalne [1].

Widzimy, że ze stanowiska statystyki drobinowej niema zasadniczej różnicy pomiędzy stanami termodynamicznie zrównoważonemi i niezrównoważonemi, inaczej mówiąc, pomiędzy przebiegami odwracalnemi i nieodwracalnemi [ponieważ tylko przebiegi nieskończenie bliskie stanów równowagi są odwracalne]. Wszystkie, byle możliwe, „stany mikroskopowe" posiadają, w stosunku do stanu wyrównanego, pewne prawdopodobieństwo i odpowiadającą mu wartość entropji. Jeśli tylko będziemy obserwowali układ drobinowy przez czas dostatecznie długi, to zobaczymy od czasu do czasu, jak się urzeczywistniają stany, choćby jaknajbardziej oddalone od stanu normalnego; w czasie cyklu Poincaré'go-Zermelo układ będzie przechodził przez te stany w kierunku to rosnącej, to malejącej entropji...

[Możemy więc zarówno obserwować przejście ze stanu A do innego stanu B o większej wartości entropji, jak i doczekać się powrotu od stanu B do stanu A o entropji zmniejszonej].

Krótko mówiąc: wszystkie przebiegi drobinowe są zasadniczo odwracalne.

Obserwowane w ostatnich latach zjawiska fluktuacyj tem najbardziej uderzają termodynamika, że widzi tu na własne oczy odwracanie przebiegów, które ogólnie są uważane za nieodwracalne... W doświadczeniach Svedberga widzimy nieustanne wahania się liczby cząstek, zawartych w danej objętości, obserwujemy więc odwrócenie procesu dyfuzji. Również ruch Browna wykazuje odwrócenie zjawiska tarcia wewnętrznego w cieczach; gdyż cząstki, które zo-

[1]) Oczywiście przy założeniu ,że siły elementarne są zachowawcze. [Ob. Helmholtz, t. I, str. 293].

stały zatrzymane wskutek tarcia w cieczy, zaczynają się następnie same poruszać; cząstki, które wskutek ciężkości zbliżyły się do dna naczynia, od czasu do czasu same przez się podnoszą się do wyższego poziomu.

Jest że więc to tylko przesąd, który wywołuje w nas złudzenie, że dyfuzja, tarcie wewnętrzne i t. d. są nieodwracalne? Bynajmniej! chodzi tu bowiem wyłącznie o rodzaj stanu początkowego i o czas trwania obserwacji. Gdybyśmy obserwację prowadzili przez czas niezmiernie długi, to wszystkie przebiegi wydawałyby się nam odwracalnemi; stany w przybliżeniu normalne powtarzałyby się często, stany nienormalne bardzo rzadko — ale powtarzałyby się wszystkie. Natomiast przy względnie krótkim czasie obserwacji, gdybyśmy nadto wyszli ze stanu nienormalnego, a więc bardzo nieprawdopodobnego, widzielibyśmy z reguły przechodzenie do stanów bardziej prawdopodobnych, zwiększanie entropji i przebieg wydałby się nam nieodwracalnym. Lecz liczba drobin, których działanie dostrzegamy w zjawiskach fizycznych życia codziennego, jest tak olbrzymio wielka, stany odbiegające widocznie od normalnego są tak niezmiernie nieprawdopodobne, że w krótkim przebiegu życia ludzkiego nie mamy prawie nigdy sposobności obserwowania samoczynnego powrotu do stanu pierwotnego...

Byłoby ciekawe np. przekonać się, w jakim przeciągu czasu mogłoby się zdarzyć, że tlen i wodór, zmieszane w równych częściach w przestrzeni sześciennej o krawędzi 1 cm., samorzutnie się rozłączą tak, by w jednej połowie tej przestrzeni stężenie tlenu było np. o 1°/₀ większe, niż w drugiej.

Przybliżony rachunek prowadzi do dość złożonego wzoru.

Wstawienie wartości liczbowych poucza nas, że moglibyśmy tylko wtedy mieć nadzieję jednorazowego zauważenia samoczynnego rozłączenia w podanym rozmiarze, gdybyśmy czekali na to przez czas T, rzędu wielkości wynoszącego $10^{10^{14}}$ sekund. Przebieg w tej skali możemy spokojnie uważać za nieodwracalny. Natomiast w przestrzeni o rozmiarach, odpowiadających granicy dostrzegania przez mikroskop (0,2 μ^3) czas T wynosiłby 10^{-9} sekundy. Dla tak małych przestrzeni nie może być więc nawet mowy o nieodwracalności dyfuzji.

Wogóle można powiedzieć, że nieodwracalność jest pojęciem subjektywnem obserwatora, i że stosowalność jego nie zależy od natury przebiegu, lecz od wyboru punktu wyjścia i od czasu trwania obserwacji. Nieodwracalnemi wydadzą się nam takie przebiegi, których

punkt wyjścia leży daleko poza obszarem średniej fluktuacji i który jest obserwowany przez czas krótki w porównaniu z czasem powrotu.

Niezmierne różnice ilościowe wartości czasu powrotu, które ilustrują przytoczone przykłady, usprawiedliwiają w zupełności praktyczną doniosłość pojęcia nieodwracalności i wskazują, że objaśnienie go zapomocą statystyki drobinowej nie stoi w najmniejszej sprzeczności z doświadczeniem...

V.

Autor poszukuje teraz prawidłowego sformułowania drugiej zasady. Zasada ustawicznego wzrostu entropji nie da się utrzymać wobec przytoczonych uwag. Sformułowanie: „ciepło nie może przechodzić samorzutnie od temperatury niższej do wyższej" też nie wytrzymuje krytyki, gdyż przy fluktuacjach energji [kinetycznej] odbywają się właśnie takie przejścia. Podobnie należy odrzucić sformułowania, oparte na pojęciu procesów odwracalnych, wobec trudności poprawnego sformułowania odwracalności.

Natomiast ściśle i dokładnie, z punktu widzenia statystyki drobinowej, możemy mówić, iż nie może istnieć „perpetuum mobile drugiego rodzaju", o ile sprecyzujemy to wyrażenie w ten sposób, że będzie ono oznaczało „maszynę samoczynną, o stałej, skończonej mocy (dzielności), którąby zużytkowywała ciepło, czerpane z najniższej temperatury"...

JAN PERRIN.

(Ur. 1870).

Członek Akademji Nauk w Paryżu. W r. 1905 wykazał, że promienie katodowe unoszą z sobą ujemne naboje elektryczne. Wraz ze swoimi współpracownikami zbadał doświadczalnie, z wielką starannością i bardzo obszernie, ruchy zawiesin i stwierdził przytem doskonałą zgodność doświadczenia z teorją ruchów B r o w n a. Wyniki badań zebrał w popularnej książce „Les atomes", z której urywki przytaczamy.

Z szeregu metod badania wybraliśmy dwie: obserwację rozkładu cząstek zawiesiny w kierunku pionowym (1909) oraz obserwację torów ruchów B r o w n a (1908); pierwsza z nich opiera się na bardzo pouczającej analogji, a przytem odznacza się dokładnością; druga najbardziej wnika w szczegóły ruchu brownowskiego.

WYJĄTKI Z KSIĄŻKI P. T.

Atomy [1].

W pierwszym rozdziale autor rozpatruje prawo van t'Hoffa, dotyczące ciśnienia osmotycznego roztworów rozcieńczonych; formułuje je tak:

Każda materja rozpuszczona wywiera na ściankę, która ją zatrzymuje, a przepuszcza rozpuszczalnik, ciśnienie osmotyczne równe temu ciśnieniu, jakie w tej samej objętości wytworzyłaby materja gazowa, zawierająca taką samą liczbę drobin gramowych. Zakładając hipotezę Avogadry, możemy to wyrazić inaczej. Ta sama liczba jakichkolwiek drobin, czy to w stanie gazowym, czy w roztworze, zamkniętych w tej samej objętości, wywiera w tej samej temperaturze takie samo ciśnienie na ścianki, które je zatrzymują.

Równowaga statystyczna zawiesin.

§ 53. *Rozszerzanie praw gazu na zawiesiny rozcieńczone.* ...Prawa te stosują się bez różnicy do wszelkich drobin, małych czy dużych, ciężkich czy lekkich. Drobina cukru, zawierająca 45 atomów, i drobina chininy, zawierająca ich przeszło 100, nie znaczą ani mniej ani więcej, niż ruchliwa drobina wody, która zawiera zaledwie 3 atomy.

Czyż nie można przypuścić, że niema granicy wielkości skupień atomów, do których prawo to się stosuje? Czyż nie można przypuścić, że nawet cząstki widzialne spełniają je jeszcze dokładnie, tak że ziarenko, poruszane ruchem Browna, nie znaczy ani mniej, ani więcej, niż zwykła drobina, o ile chodzi o działanie jej uderzeń o ściankę, która ją powstrzymuje? Krótko mówiąc, czyż nie można przypuścić, że prawa gazów doskonałych stosują się do zawiesin, utworzonych z cząstek widzialnych?

---

[1]) „Les Atomes". Tłumaczone z II wyd.. Paryż, 1913.

Poszukiwałem „experimentum crucis", które mogłoby dostarczyć mocnej podstawy doświadczalnej dla atakowania lub obrony teorji kinetycznej. Oto, co mi się wydawało najprostszem.

§ 54. *Rozkład ciśnienia w słupie pionowym gazu w równowadze.* Każdy wie, że powietrze jest bardziej rozrzedzone na szczytach gór, niż na poziomie morza, i że, mówiąc ogólnie, słup pionowy gazu jest ugniatany swym własnym ciężarem. Prawo rozrzedzenia dał L a p l a c e...

W celu wyprowadzenia tego prawa weźmy pod uwagę cienką warstwę walcowatą poziomą, o podstawie równej jednostce powierzchni, i o wysokości h; ciśnienia, wywierane na 2 powierzchnie tej warstwy, różnią się nieco od siebie i wynoszą p i p'. Nic nie zmieniłoby się w stanie warstwy, gdyby ją uwięzić pomiędzy dwoma tłokami, utrzymywanemi przez te właśnie ciśnienia; różnica między niemi powinna równoważyć siłę gm ciężkości, kierującą wdół masę m całej warstwy. Ta masa m tak się ma do masy drobiny gramowej M gazu, jak jej objętość $(1 \times h)$ ma się do objętości v drobiny gramowej pod tem samem ciśnieniem średniem; tak więc

$$p - p' = g \frac{M}{v} h$$

Ponieważ ciśnienie średnie mało różni się od p, możemy (zgodnie z równaniem gazów doskonałych) zastąpić v przez $\frac{RT}{p}$ [gdzie T jest temperaturą w skali bezwzględnej, a R stałą gazową, wielkością wspólną w równaniu $pv = RT$ dla wszystkich gazów, wziętych w ilości drobin gramowych] i napisać

$$p - p' = \frac{Mgh}{RT} p$$

albo

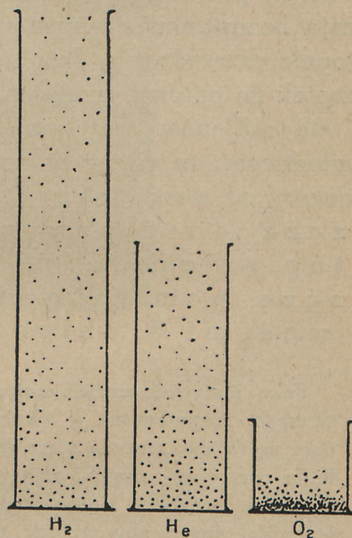
$$p' = p\left(1 - \frac{Mgh}{RT}\right).$$

Widzimy, że jeśli tylko obierzemy grubość warstwy h, stosunek ciśnień na jej dwie powierzchnie jest ustalony, niezależny od poziomu, na jakim warstwa się znajduje. Jeśli np. w powietrzu, o temperaturze zwykłej, wstępujemy po schodach, ciśnienie zmniejsza się w tym samym stosunku za każdym stopniem (o $\frac{1}{40000}$, gdy wysokość

stopnia wynosi 20 cm.). Jeśli p_0 oznacza ciśnienie u dołu schodów, to po pierwszym stopniu wyniesie ono $p_0\left(1-\frac{ghM}{RT}\right)$, po drugim stopniu zmniejszy się znów w tym samym stosunku, a więc wyniesie $p_0\left(1-\frac{Mgh}{RT}\right)^2$ po stu stopniach będzie równe $p_0\left(1-\frac{Mgh}{RT}\right)^{100}$ i t. d... W powietrzu o temperaturze zwykłej ciśnienie spada do połowy za każdem wzniesieniem się o 6 km. (w czystym tlenie wystarczyłoby 5 km.).

Ponieważ ciśnienie jest proporcjonalne do gęstości, a więc i do liczby drobin w jednostce objętości, więc rzecz jasna, że możemy zastąpić stosunek ciśnień $\frac{p_0}{p}$ przez stosunek $\frac{n_0}{n}$ liczby drobin na dwóch poziomach rozpatrywanych.

Lecz wzniesienie, którego potrzeba, aby sprowadzić określone rozrzedzenie, jest różne dla różnych gazów. Ze wzoru odczytujemy, że stosunek ciśnień nie zmienia się, jeśli iloczyn *Mh* pozostaje stałym. Innemi słowy, jeśli drobina gramowa innego gazu jest 16 razy lżejsza od drobiny gramowej gazu danego, to wzniesienie, potrzebne do wywołania tego samego rozrzedzenia, będzie 16 razy większe w nowym gazie. Ponieważ w tlenie o temperaturze 0° trzeba się wznieść o 5 km., aby gęstość stała się o połowę mniejsza, to w wodorze należałoby wznieść się o 80 km., aby osiągnąć to samo.



Rys. 70.
Rozkład drobin różnych gazów pod wpływem ciężkości.

Na rys. 70 wyobraziłem trzy olbrzymie probówki pionowe (największa 300 km. wysokości), do którychby wpuszczono równe liczby drobin wodoru, helu i tlenu. Gdyby temperatura była jednostajna, drobiny rozłożyłyby się tak, jak wskazuje wykres — tem bardziej skupiłyby się u dołu, im są cięższe.

55. *Zastosowanie do zawiesin.* Widzimy, jak można powyższe rozumowanie rozciągnąć na zawiesiny, o ile prawa gazu do nich się stosują. Cząstki zawiesiny muszą być zupełnie jednakowe, podobnie jak drobiny gazu. Tłoki, o których była mowa,

muszą być „nawpół przepuszczalne", przepuszczając wodę, zatrzymując cząstki. „Drobina gramowa" cząstek będzie wynosiła Nm, gdzie N jest liczbą Avogadry, a m masą jednej cząstki. Wreszcie siła, wywierana przez ciężkość, nie będzie ciężarem mg cząstki, lecz jej „ciężarem czynnym", czyli przewyżką tego ciężaru nad parciem, wywieranem przez otaczającą ciecz.

Parcie to wynosi $m\frac{d}{D}g$, gdzie D jest gęstością materji cząstek, a d gęstością cieczy. Małe wzniesienie h zmniejsza więc zawartość cząstek od n do n', według wzoru

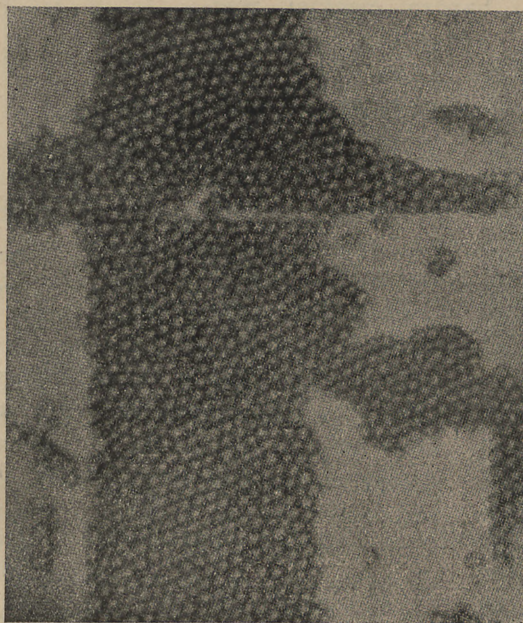
$$\frac{n'}{n}=1-\frac{N}{RT}m\left(1-\frac{d}{D}\right)gh\ldots$$

Gdy więc zostanie osiągnięty stan równowagi pomiędzy ciężkością, która skupia cząstki na spodzie, a ruchami Browna, które je rozpraszają bezustanku, równym poziomom powinny towarzyszyć równe stopnie rozrzedzenia. Jeśli jednak na to, aby zredukować zawartość cząstek do połowy, trzeba się wznieść zaledwie o $^1/_{20}$ milimetra, czyli o sto miljonów razy mniej, niż w tlenie, to można będzie stąd wnioskować, że ciężar czynny każdej cząstki jest sto miljonów razy większy od masy drobiny tlenu. Ten ciężar cząstki, jeszcze dostępny pomiarowi, ma służyć za stopień pośredni, za niezbędne ogniwo łączące pomiędzy masami o zwykłej skali, a masami drobinowemi.

Jako materjał cząstek autor wziął gumigutę, farbę pochodzenia roślinnego; rozpuszczona w alkoholu i następnie rozcieńczona dużą ilością wody, daje zawiesinę, złożoną z maleńkich kuleczek. Zawiesina zostaje poddana działaniu centryfugi; cząstki zostają odrzucone ku zewnątrz i osiadają na ściance naczynia, przyczem ziarna większe osiadają prędzej, niż małe. Tę okoliczność wyzyskał autor, aby wybrać z zawiesiny cząstki o zbliżonej do siebie wielkości. Wielokrotne powtarzanie tej operacji pozwalało coraz bardziej ujednostajniać wymiary cząstek. *Po kilku miesiącach* pracy z kilograma gumiguty otrzymano kilka decygramów cząstek pożądanej wielkości. Należało zmierzyć ich gęstość i objętość.

Gęstość znaleziono albo wysuszając zawiesinę, póki nie utworzyła cieczy lepkiej, prawdopodobnie pozbawionej już wody, i mierząc jej gęstość; albo dodając do zawiesiny bromku potasu póty, póki gęstość roztworu nie stała się równa gęstości cząstek, co poznawano po tem, że podczas centryfugowania cząstki pozostawały w zawieszeniu, nie dążąc ani ku obwodowi, ani ku osi centryfugi. Wartości znalezione wahały się od 1,194 do 1,195.

Do mierzenia średnicy (objętości) cząstek używano 3 metod: a) gdy kropelkę zawiesiny wysuszyć na szkiełku objektywnem, cząstki skupiają się na szkiełku, tworząc pojedyńczą warstwę ściśle skupionych kulek (rys. 71); zapomocą mikroskopu z mikrometrem można zmierzyć długość całego szeregu i obliczyć średnicę pojedyńczej cząstki. b) Liczy się ilość cząstek, jakie osadzają się na ściance naczynia i waży je następnie; znając gęstość, można obli-



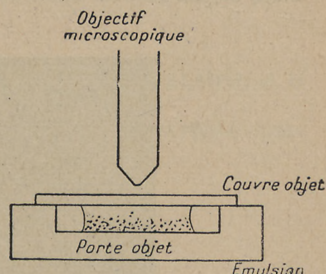
Rys. 71.
Widok warstewki cząstek gumiguty pod mikroskopem.

czyć objętość pojedyńczej cząstki. c) S t o k e s znalazł prawo (ob. tom II, prace M i l l i k a n'a nad pomiarem nabcju elementarnego) dla oporu, jakiego doznaje kulka poruszająca się w cieczy. Ten opór powoduje, że kulka opada w cieczy ruchem jednostajnym; z prędkości opadania można obliczyć opór stawiany, a znając spółczynnik tarcia wewnętrznego cieczy, znaleźć według prawa S t o k e s'a średnicę cząstki. Wartość średnicy, znaleziona temi trzema metodami, waha się od 0,3667 do 0, 371 mikrona; zgodność liczb jest więc zupełnie dobra.

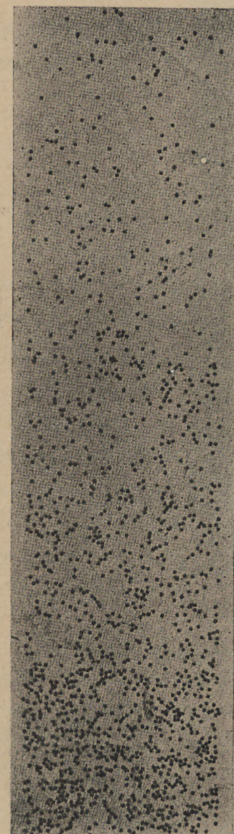
61. *Obserwacja zawiesiny.* Badanie wziętych przezemnie zawiesin odbywa się nie na przestrzeni kilku centymetrów, lub choćby kilku milimetrów, lecz na wysokościach mniejszych od dziesiątej części milimetra. Posługiwałem się więc mikroskopem. Kropelkę za-

wiesiny umieszcza się w płaskiem naczyńku (głębokości 0,1 mm...) i spłaszcza się szkiełkiem przykrywkowem, którem pokrywa się naczyńko...

Można, jak wskazuje rys. 72, umieścić preparat poziomo, a tubus mikroskopu pionowo. Użyty objektyw o silnem powiększeniu ma bardzo małą głębokość pola widzenia i w danej chwili widać wyraźnie tylko cząstki jednej, bardzo cienkiej warstewki poziomej, której grubość wynosi około 1 mikrona. Podnosząc lub opuszczając mikroskop, dostrzega się cząstki innej warstewki.



Rys. 72.
Metoda Perrin'a badania rozkładu zawiesiny.


Rys. 73.
Rozkład cząstek zawiesiny pod wpływem ciężkości.

Tą drogą można stwierdzić, że rozkład cząstek, prawie jednostajny po zaburzeniu, jakie towarzyszy umieszczeniu kropli, szybko traci jednostajność; warstwy dolne stają się bogatsze w cząstki, niż warstwy górne, lecz to wzbogacenie się idzie coraz to wolniej, aż w końcu zawiesina przybiera postać, która już się nie zmienia. Zostaje urzeczywistniony stan stateczny, w którym stężenie maleje z wysokością. Można mieć wyobrażenie o tym rozkładzie z umieszczonego tu rysunku, który powstał przez ustawienie jeden nad drugim rysunków, wyobrażających rozmieszczenie w pewnej chwili cząstek, zawartych w pięciu warstewkach zawiesiny o równych grubościach.

62. *Liczenie cząstek.*

Należy teraz zmierzyć stosunek $\frac{n_0}{n}$ liczb cząstek w 2 warstwach; to jest utrudnione wskutek ciągłego ruchu cząstek, które znikają też, lub pojawiają się ustawicznie w polu widzenia. Sposób fotografowania widzianego obrazu nie dał dobrych wyników z powodu trudności technicznych.

W tym wypadku zmniejszałem pole widzenia przez umieszczenie w płaszczyźnie ogniskowej okularu przesłony z blaszki metalowej,

w której igłą przebito maleńki okrągły otworek. Pole widzenia staje się wówczas bardzo ograniczone i oko może odrazu rozpoznać dokładnie liczbę cząstek, widocznych w danej chwili. Wystarcza, aby liczba ta nie przekraczała 5 lub 6. Umieszczając na drodze promieni, które oświetlają preparat, inną zasłonę, i odsłaniając ją w prawidłowych odstępach czasu, można notować kolejne liczby dostrzeżonych cząstek; niechaj to będzie np.:

3, 2, 0, 3, 2, 2, 5, 3, 1, 2...

Tak samo na innym poziomie można obserwować inny szereg liczb:

2, 1, 0, 0, 1, 1, 3, 1, 0, 0...

Biorąc pod uwagę przypadkowość ruchów Browna, łatwo zrozumieć, że np. 200 takich odczytań zastępuje fotografję momentalną, obejmującą pole widzenia 200 razy bardziej rozległe.

64. *Prawo zmniejszania się stężenia.* ...Serja bardzo starannych pomiarów była wykonana dla cząstek gumiguty o promieniu 0,212 μ. Odczytania były robione w naczyńku o głębokości 100 μ. na czterech równoległych poziomach, przecinających naczyńko na wysokościach

5 μ, 35 μ, 65 μ, 95 μ.

Z przeliczenia 13000 cząstek, otrzymałem zagęszczenia, proporcjonalne do liczb:

100, 47, 22,6, 12.

Są one bardzo bliskie liczb:

100, 48, 23, 11,1,

które tworzą szereg geometryczny.

Inna serja była wykonana z większemi cząstkami mastyksu (promień 0,52 μ). Fotografje 4 równoległych przekrojów, oddalonych wzajemnie od siebie o 6 mikronów, dały:

1880, 940, 530 i 305

obrazów cząstek, liczby mało różne od

1880, 995, 528 i 280,

które maleją w postępie geometrycznym.

W ostatnim wypadku zagęszczenie na wysokości 96 μ. byłoby 60000 razy mniejsze, niż na dnie...

Możnaby przytoczyć inne jeszcze szeregi. Krótko mówiąc, przewidywane prawo rozrzedzenia jest napewno spełnione. Lecz czy prowadzi ono do takich wielkości drobinowych, jakich oczekujemy?

65. *Dowód decydujący.*

Z równania w § 55 można, po prostem przekształceniu, z łatwością obliczyć liczbę A v o g a d r y N.

...Doznałem żywego wzruszenia, gdy, zaraz od pierwszych prób, zacząłem otrzymywać te same liczby, do których teorja kinetyczna dochodzi na drogach tak zupełnie odmiennych. Zmieniałem zresztą znacznie warunki doświadczenia. Objętości mych cząstek zmieniały się w granicach, objętych stosunkiem liczb 1 : 50. Zmieniałem materjał cząstek, biorąc do tego (z pomocą p. D ą b r o w s k i e g o) mastyks i gumigutę. Zmieniałem ciecz (obserwując z p. Nielsem B j e r r r u m), badając ziarna gumiguty w glicerynie o 12% wody, 125 razy bardziej lepkiej, niż woda...

Pomimo tych wszystkich zmian wartość liczby Avogadry pozostawała widocznie jednakowa, wahając się nieprawidłowo od 65.10^{22} do 72.10^{22}. Gdybyśmy nawet nie posiadali innych danych, dotyczących wielkości drobinowych, t a s t a ł o ś ć u s p r a w i e d l i w i a ł a b y h i p o t e z y, k t ó r e n a s w i o d ł y p r z y b a d a n i a c h, i niewątpliwie uznalibyśmy wartości, jakie przypisuje masom atomów i drobin, za wielce prawdopodobne.

Lecz, ponadto, liczba znaleziona zgadza się z tą, którą przyjmuje teorja kinetyczna dla zdania sprawy z lepkości gazów (60.10^{22}). T a d e c y d u j ą c a z g o d n o ś ć n i e p o z o s t a w i a n a j m n i e j s z e j w ą t p l i w o ś c i c o d o n a t u r y r u c h ó w B r o w n a... T r u d n o w i ę c z a p r z e c z a ć r e a l n e m u i s t n i e n i u d r o b i n. Jednocześnie ruch drobinowy stał się dostrzegalny. Ruch Browna jest jego wiernym obrazem, a raczej jest on już ruchem drobinowym, z tej samej racji, z jakiej promieniowanie podczerwone jest już światłem...

67. *Wyznaczenie dokładne wielkości drobinowych.*

Przyjmując jako najprawdopodobniejszą wartość N, otrzymaną z pomiarów autora

$$N = 68{,}2 \,.\, 10^{22}$$

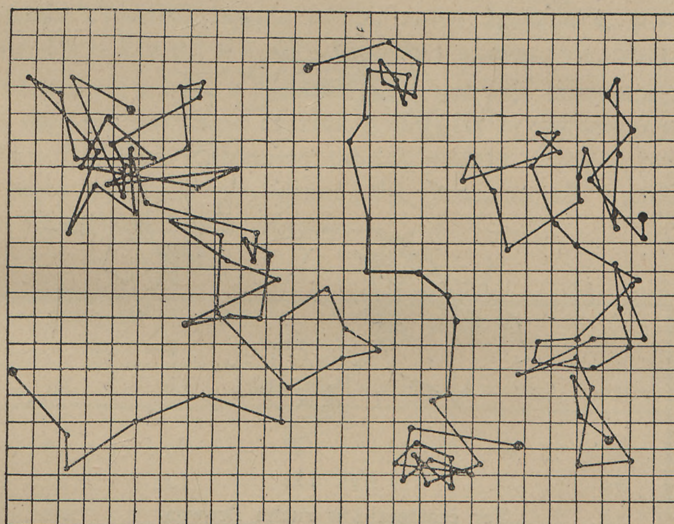
łatwo obliczyć masę atomu wodoru, na tej zasadzie, że w drobinie gramowej, czyli w 2 gr. wodoru mieści się N drobin, czyli $2N$ atomów. Wynosi ona $1{,}47 \,.\, 10^{-24}$ gr. Znając średnią drogę swobodną drobin gazu oraz liczbę Avogadry, można, posługując się wzorem C l a u s i u s'a (str. 364), obliczyć przybliżony promień i przekrój drobiny.

P e r r i n oblicza to dla kilku gazów i otrzymuje liczby:

hel . . .	$1{,}7 \cdot 10^{-8}$ cm.	azot . . .	$2{,}8 \cdot 10^{-8}$ cm.
wodór . .	2,1 „ „	rtęć . . .	2,9 „ „
tlen . . .	2,7 „ „	chlor . . .	4,1 „ „

Prawa ruchów Browna.

...Załamania toru [cząstek] są tak liczne i tak gwałtowne, że niepodobna za niemi śledzić, a tor zauważony jest nieskończenie prostszy i krótszy od toru rzeczywistego. Również i pozorna prędkość średnia zmienia się w sposób s z a l o n y pod względem wartości



Rys. 74.
Przesunięcia cząstek zawiesiny, poruszanej ruchem Browna.

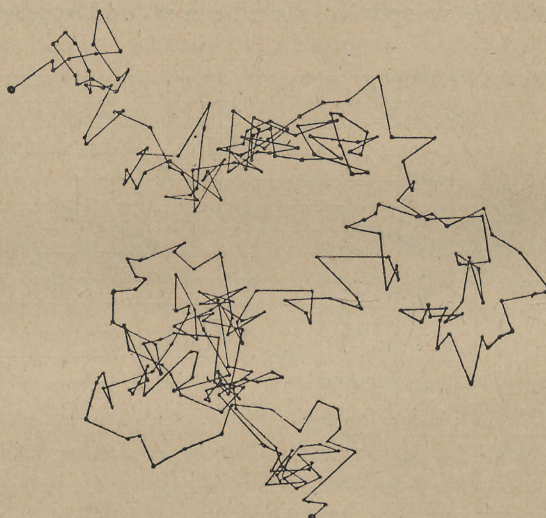
i kierunku i nie dąży do jakiejkolwiek granicy, gdy czas obserwacji maleje; widać to odrazu, gdy notujemy położenia cząstki najpierw co minutę, a następnie np. co 5 sekund, a lepiej jeszcze fotografując ją co $^1/_{20}$ sekundy, jak to robili pp. V i c t o r H e n r i, C o m a n d o n lub d e B r o g l i e.

Teorja E i n s t e i n a i S m o l u c h o w s k i e g o prowadzi do wniosku, że przesunięcia poziome cząstki są proporcjonalne do pierwiastka kwadratowego z czasu trwania ruchu (ob. str. 396).

Sprawdzenie doświadczalne.

72. *Złożony charakter toru cząstki.* Na podstawie samego wyglądu ruchu brownowskiego przyjęliśmy to, co stanowi podstawę teorji Einsteina, że ruch ten (w kierunku prostopadłym do kierunku ciężkości) jest zupełnie nieprawidłowy. Choć wydaje się to bardzo prawdopodobnem, dobrze jednak będzie przekonać się o tem w sposób ścisły.

Będziemy w tym celu mierzyli przesunięcia (poziome) kolejne jednej i tej samej cząstki. Wystarcza do tego notowanie w polu widze-



Rys. 75.
Tor cząsteczki w ruchu Browna.

nia mikroskopu, o znanem powiększeniu, położeń tej samej cząstki w równych odstępach czasu. Na załączonym rys. 74 umieszczono 3 wykresy, otrzymane przez połączenie kolejnych położeń cząstki mastyksu, wyznaczanych co 30 sekund; powiększenie rysunku jest takie, że 16 podziałek wyobraża 50 mikronów...

Zarówno ten rysunek, jak i następny (75), zawierający w dowolnej skali większą liczbę przesunięć, dają zaledwie blade wyobrażenie o niezmiernej zawiłości toru rzeczywistego. Gdybyśmy, istotnie, robili notowania w odstępach czasu 100 razy krótszych, każdy odcinek musiałby być zastąpiony przez kontur wielokątny, w odpowiedniej skali równie złożony, jak cały rysunek pierwotny, — i tak dalej...

73. *Całkowita nieprawidłowość ruchu.* Jeśli ruch jest zupełnie nieprawidłowy, kwadrat średni X^2 rzutu przesunięcia na jakąś oś powinien być proporcjonalny do czasu. Wielka liczba wyznaczeń wykazała w samej rzeczy, że ten średni kwadrat jest z dużem przybliżeniem dwa razy większy, gdy trwanie obserwacji wynosi 120 sekund zamiast 30.

Jeszcze zupełniejszy dowód otrzymamy, jeśli rozumowanie, stosowane przez Maxwella do prędkości drobinowych, rozszerzymy na przesunięcia; rozumowanie to powinno dać się stosować równie dobrze w obu wypadkach.

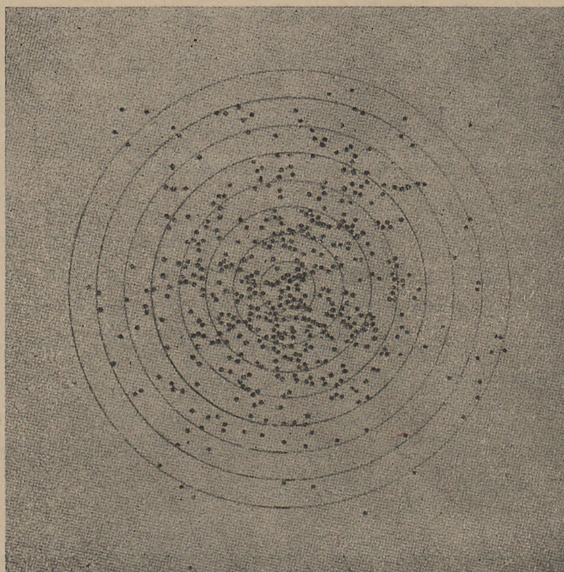
Przedewszystkiem rzuty przesunięć na pewną oś, podobnie jak rzuty prędkości, powinny rozmieścić się wokół wartości średniej (która tu, z powodu symetrji, będzie równa zeru) zgodnie z prawem przypadku Laplace'a i Gaussa [por. str. 363].

P. Chaudesaigues, pracując w mojem laboratorjum, wyznaczał i obliczał położenia cząstek gumiguty, przygotowanych przezemnie ($a = 0{,}212\ \mu$). Załączona tablica podaje liczby n przesunięć, których rzuty są zawarte w granicach, stanowiących wielokrotności 1,7 μ (co odpowiada 5 mm. kratki):

Rzuty (w μ) w granicach		Serja I		Serja II	
od	do	n zmierz.	n oblicz.	n zmierz.	n oblicz.
0	1,7	38	48	48	44
1,7	3,4	44	43	38	40
3,4	5,1	33	40	36	35
5.1	6,8	33	30	29	28
6.8	8,5	35	23	16	21
8,5	10,2	11	16	15	15
10,2	11,9	14	11	8	10
11,9	13,6	6	6	7	5
13,6	15,3	5	4	4	4
15,3	17,0	2	2	4	2

Inne sprawdzenie, bardziej jeszcze uderzające, którego pomysł zawdzięczam Langevin'owi, polega na przeniesieniu równoległem dostrzeżonych przesunięć poziomych, tak aby im nadać wspólny

punkt początkowy [1]). Końce tak otrzymanych wektorów powinny rozłożyć się wokoło tego punktu, tak jak kule, wystrzelone do tarczy, rozkładają się naokoło środka celu. To właśnie daje się stwierdzić na przytoczonym rysunku, na którym widzimy rozkład 500 obser-



Rys. 76.
Rozkład przesunięć w ruchu Browna.

wacyj, jakich dokonałem z ziarnami o promieniu 0,367 μ, notując ich położenia co 30 sekund. Kwadrat średni e^2 tych przesunięć równał się kwadratowi liczby 7,84 μ. Koła na rysunku mają promienie

$$\frac{e}{4}, \frac{2e}{4}, \frac{3e}{4} \text{ i t. d.}$$

I tu możemy sprawdzać ilościowo; prawo przypadku pozwala obliczyć, ile punktów powinno się zmieścić w każdym z kolejnych pierścieni tarczy. W następującej tablicy widzimy obok prawdopodobieństwa P, by koniec przesunięcia przypadł na jeden z pierścieni, liczby n obliczone i zaobserwowane dla 500 zmierzonych przesunięć.

---

[1]) [To odpowiadałoby obserwacji cząstek, wyrzuszających z jednego i tego samego punktu wyjścia].

Przesunięcie w granicach od	do	P na pierścień	n obliczone	n znalezione
0	$\frac{e}{4}$	0,063	32	34
$\frac{e}{4}$	$2\frac{e}{4}$	0,167	83	78
$2\frac{e}{4}$	$3\frac{e}{4}$	0,214	107	106
$3\frac{e}{4}$	$4\frac{e}{4}$	0,210	105	103
$4\frac{e}{4}$	$5\frac{e}{4}$	0,150	75	75
$5\frac{e}{4}$	$6\frac{e}{4}$	0,100	50	49
$6\frac{e}{4}$	$7\frac{e}{4}$	0,054	27	30
$7\frac{e}{4}$	$8\frac{e}{4}$	0,028	14	17
$8\frac{e}{4}$	∞	0,014	7	9

75. *Obliczenie wielkości drobinowych na podstawie ruchów Browna.* Przeprowadziłem lub kierowałem kilkoma serjami pomiarów, zmieniając, o ile mogłem, warunki doświadczenia, w szczególności lepkość cieczy i wielkość cząstek...

Tablica poniższa streszcza wyniki tych doświadczeń; widzimy tam wartość średnią lepkości z, promień ziaren, ich masę i przybliżoną liczbę n użytych do obliczenia przesunięć.

Jak widzimy, stosunek krańcowych wartości mas przekracza 1500, a krańcowe wartości lepkości mają się do siebie, jak 1 do 125. Mimo to, bez względu na to, jaka ciecz znajdowała się pomiędzy cząstkami, stosunek $\frac{N}{10^{22}}$ pozostaje bliski 70, tak jak w wypadku rozkładu cząstek na wysokość. Ta zdumiewająca zgodność dowodzi ścisłej słuszności wzoru Einsteina i w sposób świetny potwierdza teorję drobinową. Najbardziej precyzyjne pomiary (serja VII) odnoszą się do najlepiej wyrównanych ziarn, jakie przygotowałem.

Autor opisuje szczególne środki ostrożności, stosowane przy pomiarach tej serji.

100 z	Rodzaj zawiesiny	Promienie ziaren	Masa $m \cdot 10^{15}$	Liczba przesunięć n	$\frac{N}{10^{22}}$
1	I. Ziarna gumiguty	μ 0,50	600	100	80
1	II. Podobne ziarna	0,212	48	900	69,5
4 do 5	III. Te same ziarna w wodzie ocukrzonej (35%); temperatura źle znana	0,212	48	400	55
1	IV. Ziarna mastyksu	0,52	650	1000	72,5
1,2	V. Ziarna ogromne (mastyks) w roztworze mocznika (27%)	5,50	750000	100	78
125	VI. Ziarna gumiguty w glicerynie ($^1/_{10}$ wody)	0,385	290	100	64
1	VII. Ziarna gumiguty dobrze wyrównane	0,367	246	1500	68,8

Otrzymana wartość 68,8 zgadza się z dokładnością do 1% z wartością, osiągniętą przez rozkład w słupie pionowym zawiesiny.

Przyjmuję więc, jako liczbę Avogadry,

$$68{,}5 \cdot 10^{22}$$

skąd wynika wartość naboju elektronu

$$4{,}2 \cdot 10^{-10}$$

jednostek elektrostatycznych, a masa atomu wodoru

$$1{,}47 \cdot 10^{-24} \text{ gr....}$$

Obliczenie naboju elementarnego (elektronu) ε zostało tu dokonane na następującej podstawie. Jeśli każda drobina jest obdarzona nabojem ε, to iloczyn $N\varepsilon$ będzie równy nabojowi drobiny gramowej. Przy elektrolizie wydzieleniu drobiny gramowej dowolnego jonu towarzyszy wydzielenie się naboju w ilości $F = 96500$ kulombów $= 9650$ jednostek elektromagnetycznych (t. zw. stała Faraday'a). Nabój ten powstaje stąd, że każda z drobin w liczbie N unosi z sobą nabój elementarny ε. Zatem $F = N.\varepsilon$. Aby otrzymać ε w jednostkach elektrostatycznych, musimy F pomnożyć przez stosunek jednostek elektrostatycznych do elektromagnetycznych, $c = 2{,}999 \cdot 10^{10}$. Zatem

$$\varepsilon = \frac{F \cdot c}{N}$$

[Najdokładniejszego bezpośredniego pomiaru naboju elektronu dokonał Millikan (ob. t. II) i otrzymał wartość

$$\varepsilon = 4{,}774 \text{ jedn. el. stat.}$$

Pomiary Millikan'a przewyższają pod względem precyzji pomiary Perrin'a, jego więc wynik musimy uważać za słuszny. Również i obliczona stąd wartość stałej Avogadry $N = 60{,}6 \cdot 10^{22}$ została uznana za najdokładniejszą] [1]).

Promienie atomowe.

Ogromne prędkości, jakiemi, według teorji kinetycznej, są obdarzone drobiny gazu (ob. str. 360), znalazły zupełne, choć tylko pośrednie i jakościowe potwierdzenie w gwałtowności ruchów Browna (ob. str. 413). Masy cząstek gumiguty, używanych przez Perrin'a, były rzędu 4.10^{-14}; masa drobiny wody wynosi $\frac{18}{60 \cdot 10^{22}} = 3.10^{-23}$ gr. jest więc 10^9 razy mniejsza; prędkość drobiny musi być więc jeszcze kilka dziesiątków tysięcy razy większa od prędkości, jaką przez zderzenie udziela cząsteczce gumiguty.

W r. 1911 L. Dunoyer opisał niezmiernie prostą, a pomysłową metodę, zapomocą której można bezpośrednio uwidocznić ruchy drobin, a O. Stern w r. 1920 udoskonalił tę metodę w celu bezpośredniego zmierzenia prędkości tych ruchów i porównania ich z wartościami teoretycznemi. Oba te doświadczenia pozwalają w sposób prawie namacalny przekonać się o istnieniu ruchów drobinowych, przewidzianych przez myślicieli - teoretyków, a zdradzonych naszym grubym zmysłom przez ruchy cząsteczek zawiesin.

---

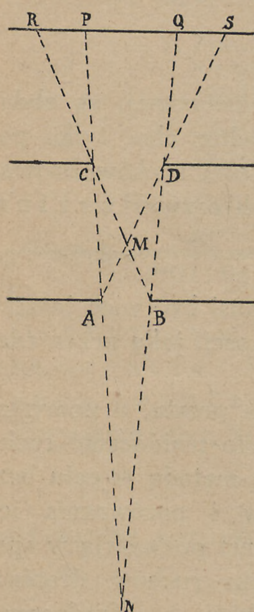
[1]) Ładnie opracowany zarys kinetycznej teorji materji znajdzie czytelnik w artykule prof. Z. Klemensiewicza „Atomistyka materji" w wydawnictwie zbiorowem „Fizyka współczesna" zesz. I („Fizyka i Chemja w Szkole", t. III, 1). Warszawa, 1929.

L. DUNOYER.

O teorji kinetycznej gazów i o urzeczywistnieniu promieniowania materjalnego o pochodzeniu cieplnem[1]).

...Następujące doświadczenie zdaje się uwidoczniać w sposób bardzo uderzający ruch drobinowy w masie gazu. Weźmy np. rurkę szklaną, podzieloną na trzy komory zapomocą przegródek, prostopadłych do osi rurki; każda przegroda ma w środku przebity maleńki otwór, stanowi więc przesłonę (diafragmę).

Ustawiamy rurkę pionowo, umieściwszy uprzednio w dolnej komorze drobną ilość ciała, które w temperaturze zwykłej jest tak mało lotne, że nie przeszkadza utrzymać w rurce wysokiej próżni; można do tego użyć np. czystego metalu alkalicznego. Po opróżnieniu jaknajstaranniejszem rurki ogrzewamy jej dolną komorę do odpowiedniej temperatury; dla sodu będzie to około 400°. Metal ulatnia się, i jego drobiny poruszają się w dolnej komorze we wszystkich kierunkach z taką prędkością średnią, jaka odpowiada temperaturze 400°. Niektóre zpośród drobin przejdą przez przesłonę, oddzielającą komorę dolną od środkowej; większość uderzy o ścianki komory lub o dolną ściankę drugiej przesłony i, po pewnej liczbie uderzeń, osadzą się na ściankach pod postacią błyszczącego nalotu przedestylowanego metalu. Lecz niektóre przejdą przez drugą przesłonę; będą to te przedewszystkiem, które przeszły przez pierwszy otwór w kierunku bardzo bliżonym do osi rurki. Innemi słowy, działanie obu przesłon wyodrębni zpomiędzy drobin, uchodzących z dolnej komory, i dopuści do trzeciej komory górnej tylko takie drobiny, których prędkości leżą wewnątrz dwóch stożków; podstawami ich są obwody otworów przesłon *AB* i *CD*, a wierzchołki leżą: jeden w *M* pomię-



Rys. 76.
Schemat obserwacji promieni atomowych.

[1]) „Sur la théorie des gaz et la réalisation d'un rayonnement matériel d'un origine thérmique". Comptes rendus, t. 152, r. 1911.

dzy przesłonami, a drugi w *N* na przedłużeniu linji, łączącej środki otworów. Zderzeń pomiędzy temi drobinami prawie nie będzie, ponieważ prędkości ich są skierowane prawie równolegle, a gazu obcego, jak przypuszczamy, niema wcale, lub jest obecny w ilości, którą można pominąć; drobiny te będą dążyły dalej z prędkością, której wartość średnia (dla sodu ogrzanego do 400°) wynosi około 550 m./sek. — aż do napotkania zakończenia rurki. Tam... utworzą osad metaliczny na końcu rurki. Jeżeli na ich drodze ustawić przeszkodę, np. cienką pałeczkę szklaną, która zatrzyma napotkane drobiny, na ściance wytworzy się *cień* w postaci braku osadu. Ponieważ przesłony wyznaczają dwa stożki promieniowania, zauważymy nawet istnienie *cienia* i *półcienia*; podobnie płaszczyzna [*AB*], wysyłająca światło we wszystkich kierunkach, utworzy plamę świetlną jaśniejszą w obszarze środkowym [*PQ*], wspólnym dla obu stożków, a mniej jasną w obszarze [*RP*, *QS*], należącym tylko do jednego stożka, z wierzchołkiem wewnętrznym [*M*].

Doświadczenie świetnie stwierdza pojawianie się osadu metalicznego i cieniów na górnym końcu rurki. W komorze środkowej widać niezmiernie cienki osad o zabarwieniu, zmieniającem się wraz z grubością. Grubość ta rośnie, poczynając od zera, gdy stopniowo oddalamy się od dolnej przesłony...

W komorze górnej *na ściankach pionowych niema żadnego osadu; na końcu rurki widać bardzo ostro zarysowany błyszczący osad, który odpowiada przecięciu przez ściankę stożka* [*ABMRS*], *dotykającego wewnętrznie obu otworów;* obszar środkowy [*PQ*] wzmocniony i dość wyraźnie odcinający się od reszty, odpowiada części wspólnej obu stożków. Cień, rzucany przez pręcik szklany, umieszczony poprzecznie w górnej komorze, jest zarysowany bezwzględnie ostro.

A więc w doświadczeniach moich *drobiny* (dość liczne na to, aby w przeciągu kilku minut wytworzyć błyszczący osad) *przebywały tory prostolinjowe, niemal równoległe lub zlekka rozbieżne, o długości około 20 cm.* Nic nie wskazuje, aby ta wartość nie mogła być z łatwością przekroczona [1])...

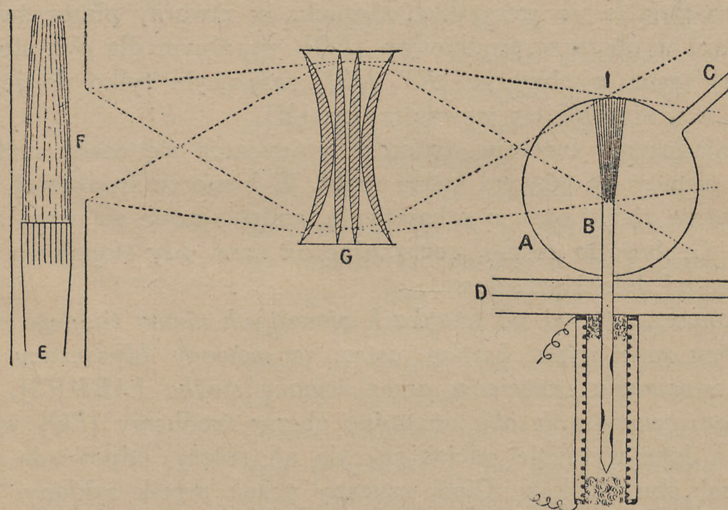
---

[1]) Odpowiada to średniej drodze swobodnej drobin gazu w równowadze statystycznej, pod ciśnieniem kilku dziesięciotysiącznych milimetra rtęci, co odpowiada ciśnieniu gazów obcych, pozostałych jeszcze po wypompowaniu moich rurek.

W r. 1913 Dunoyer unaocznił przebieg wiązki odkrytych przez siebie promieni materjalnych, posługując się zjawiskiem rezonansu optycznego [1]).

O rezonansie optycznym gazów i par [2]).

...W małej bańce *A* wytwarzamy strumień prostolinjowy drobin sodu, ogrzewając dolną część rurki *B* [zawierającą sód metaliczny] i utrzymując w bańce próżnię bardzo daleko posuniętą zapomocą pompy, dołączonej do rury *C*. Aby lepiej móc wyznaczyć punkt, poczynając od którego można wiązkę swobodnie obserwować, doprowadza się ją aż do wnętrza bańki kanałem, utworzonym z rurki *B*.



Rys. 78.
Uwidocznienie promieni atomowych zapomocą rezonansu optycznego.

Światła pobudzającego dostarcza płomień sodowy *E* bardzo ubogi w sód, otoczony kominkiem, w którym wycięto okienko *F*; układ soczewek *G* tworzy obraz tego okienka na osi wiązki drobin...

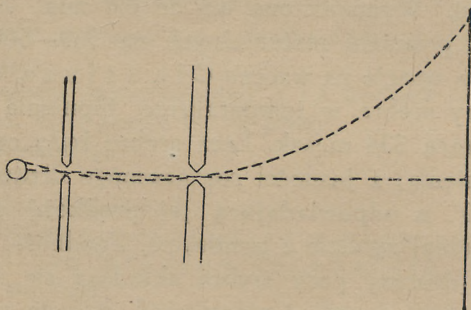
---

[1]) Niektóre linje widm pierwiastków w stanie gazowym mają następującą własność: jeśli gaz lub parę pobudzić do promieniowania, zawierającego falę odpowiadającą tej linji, i oświetlić niem drugą porcję tego samego gazu, to zostanie ona pobudzona do wysyłania promieniowania o tej samej długości fali. Zjawisko to, odkryte przez R. W. Wood'a w r. 1912 na parze rtęci, nosi nazwę rezonansu optycznego.

[2]) „Sur la résonance optique des gaz et des vapeurs". Le Radium, t. X, r. 1913.

Gdy w dolnej części rurki *B* ogrzewa się czysty sód do 400° C, dostrzega się odrazu wiązkę świecącą, położoną tak, jak wskazuje rysunek; wiązka świeci słabo, ale odcina się bardzo ostro od ogólnej ciemności, jaka panuje w bańce. Jednocześnie ostro zarysowana plama *I*, znacząca miejsce, gdzie wiązka uderza o ściankę, trwa bez zmiany przez czas dłuższy, np. przez godzinę; po tym czasie para zaczyna stopniowo napełniać bańkę, co można rozpoznać po ogólnem świeceniu, słabszem niż świecenie wiązki, i po zacieraniu się konturów plamy *I*...

OTTO STERN w pracy p. t. „Pomiar bezpośredni prędkości ruchów drobinowych pochodzenia cieplnego“ [1]) zdołał zmierzyć prędkość wyrzucanych atomów.



Rys. 79.
Schemat pomiaru bezpośredniego prędkości atomowych.

Idea pomiaru jest następująca: Wewnątrz naczynia dobrze opróżnionego znajduje się maleńkie naczyńko z otworkiem, napełnione gazem; drobiny, wyrzucane z otworu ruchem prostolinjowym, napotykają przesłonę z otworem, który wydziela cienką wiązkę; wiązka ta dochodzi do ekranu, na którym osadza się, tworząc okrągłą plamkę Wprawmy naczynie zewnętrzne w szybki ruch obrotowy dokoła osi, przechodzącej przez środek naczynia, to plama zostanie przesunięta nieco wtył, gdyż w czasie, potrzebnym drobinie do przebieżenia drogi pomiędzy przesłoną i otworem, ekran przesunął się względem toru drobiny. Względem płaszczyzny, prostopadłej do osi obrotu, ruch będzie się odbywał po torze, zbliżonym do linji parabolicznej. Znając

---

[1]) „Eine direkte Messung der thermischen Molekulargeschwindigkeit“. Zeitschr für Physik, t. 2, r. 1920.

prędkość obrotu, odległość przesłony od ekranu i wielkość przesunięcia plamy, łatwo obliczyć prędkość ruchu drobiny.

W rzeczywistem przeprowadzeniu doświadczenia za źródło wyrzucanych drobin służył drucik platynowy, długości 6 cm., o średnicy 0,4 mm., posrebrzony i ogrzewany prądem elektrycznym aż do stopienia warstwy srebra. Drobiny pary srebra, rozbiegające się we wszystkich kierunkach, napotykają dwie przesłony, umieszczone jedna za drugą, które wydzielają wąską wiązkę; wiązka pada na płytkę z polerowanego mosiądzu i pozostawia na niej ślad w kształcie linji prostej, równoległej do kierunku drutu i do otworów w przesłonach. Oś obrotu całego przyrządu przechodziła przez drut platynowy. Gdy przyrząd został wprawiony w obrót o częstości 25 obr./sek., plamka przesuwała się nieco. Obracając raz w jednę, raz w drugą stronę, otrzymano dwa ślady, których odległość równała się podwójnemu przesunięciu. Wynosiła ona 0,7 do 0,8 mm. Stąd oblicza się średnią prędkość promieni materjalnych na 560—600 m./sek. Obliczenie teoretyczne, oparte na wzorze C l a u s i u s'a, daje dla jednoatomowej drobiny srebra w temperaturze topnienia (961°) średnią prędkość, wynoszącą 534 m./sek. Lecz srebro było ogrzane powyżej temperatury topnienia; z jasności rozżarzonego drutu oceniono temperaturę na 1200°, a odpowiadającą jej prędkość drobiny na 584 m./sek. — w zupełnej zgodzie z pomiarem. Zgodność wyników wskazuje, że istotnie drobiny pary srebra składają się z pojedyńczych atomów. [Stąd nazwa *promieni atomowych,* nadana promieniom materjalnym, otrzymywanym opisanemi metodami]. W r. 1929 S t e r n z K n a u e r e m, a w r. 1930 z E s t e r m a n n e m stwierdzili ugięcie promieni atomowych przy odbiciu od powierzchni kryształów, analogicznie do ugięcia promieni katodowych. Szczegóły odnośnych doświadczeń z promieniami katodowemi i ich interpretację znajdzie czytelnik w tomie II tego wydawnictwa, w rozdziale „Kwanty i fale materji".



SPIS RZECZY.

Ruch falowy i akustyka

Opracował W. Werner

Ciepło

Opracował M. Grotowski

Kinetyczna teorja gazów i cieczy

Opracował W. Werner

ERRATA:

Str.	wiersz	wydrukowano:	powinno być:
5	13 od góry	pobawiona	pozbawiona
57	2 „	wykonując	wykonywując
57	7 „	. budował	; zbudował
80	7 „	tylki	tylko
Na str. 109—115 napis u góry stronicy powinien brzmieć: Obrót ziemi i jej masa.			
112	7 od góry	**ruchu ziemi**	**ruchu obrotowego ziemi**
112	1 od dołu	Rendues	Rendus
116	11 od góry	opuszczone daty życia Ptolomeusza 87 — 165 po Chr.	
122	19 od dołu	§ 1.	—
137	9 „	119	159
141	5 „	eletkromagnesie	elektromagnesie
147	10 od góry	30 A	30 C
147	14 „	30 B i C	30 B i A
150	4 od dołu	poruszany	poruszamy
151	13 „	kilku	kilka
160	10 „	teorjl	teorji
164	2 „	bliża	zbliża
173	13 od góry	wysokich	wysokim
186	6 „	w pewnych warunkach ciała mogą posiadać stałą, zawsze	wysiłki w celu zbudowania przyrządu dogodnego, dającego
229	3 „	Wolffkemu	Wolfkemu
229	22 „	Wolffke	Wolfke
245	9 od dołu	jekiegokolwiek	jakiegokolwiek
254	19 od góry	Dioscorsi	Discorsi
256	17 od dołu	pogodzć	pogodzić
260	21 od góry	effectum"	effectum
269	11 od dołu	12 stóp	12 cali
278	9 od góry	taki	tak
308	6 „	ngdzie	nigdzie
331	10 „	wykazywały	wykonywały
355	4 „	wdłuż	wzdłuż
366	4 od dołu	cśnieniem	ciśnieniem
389	6 od góry	zgęszczeń	zagęszczeń

Str.	*wiersz*	*wydrukowano:*	*powinno być:*
391	10 od dołu	(5) i (6)	na str. 389
397	14 od góry	doznaje	doznane
416	2 od dołu	wyrzuszających	wyruszających
417	1 „	*opuszczono:*	Obliczono na podstawie wzoru, pomieszczonego na str. 396.